

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Karlo Stilin

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

Provjera referentnog etalona sile KBNM - 500 kN

Mentor:

Izv. prof. dr. sc. Željko Alar

Student:

Karlo Stilin

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se:

- mentoru prof. dr. sc. Željku Alaru na uloženom vremenu i strpljenju, te uputama i nesebičnoj pomoći u svim područjima realizacije ovog rada
- laborantima Ivan Martinko i Roman Divjak na strpljenju i ukazanoj pomoći pri izvođenju eksperimentalnog dijela rada čije iskustvo ne može zamijeniti niti jedna literatura
- posebne zahvale asistentu Dini Bogdaniću mag. ing., na pažnji i vremenu kojeg je skupa sa mnom uložio u realizaciju proračuna eksperimentalnog dijela, uređivanja tablica i dijagrama, zbog kojeg je ovaj rad na jednom višem nivou
- također se zahvaljujem obitelji i prijateljima koji su bili podrška tokom cijelog studija

Hvala vam!

Karlo Stilin



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala te mehatronika i robotika

| | |
|--|--------|
| Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje | |
| Datum | Prilog |
| Klasa: | |
| Ur. broj: | |

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Karlo Stilin**

Mat. br.: 0035186138

Naslov rada na
hrvatskom jeziku: **Provjera referentnog etalona sile KBNM-500 kN**

Naslov rada na
engleskom jeziku: **Verification of Reference Force Standard KBNM-500 kN**

Opis zadatka:

Mjerenje sile vrlo je važno jer se na temelju toga određuju mehanička svojstva nekog materijala, strojnog dijela ili čitavog proizvoda. Da bi postojalo određeno povjerenje u rezultate mjerenja bitno je uspostavljanje i održavanje mjerne sljedivosti rezultata mjerenja sile od ispitne opreme pa do nacionalnog etalona. U tom lancu se nalazi i referentni etalon sile KBNM-500 kN instaliran u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava. Njegovo umjeravanje se provodi posredničkim etalonima sile čije je umjeravanje prethodno provedeno na primarnom etalonu sile te je stoga potrebno provesti provjeru stalnosti pokazivanja referentnog etalona KBNM-500 kN. U sklopu ovog rada potrebno je provesti sljedeće:

1. opisati općenito značenje mjerne veličine sile
2. navesti vrste etalonskih mjerila sile te načine ostvarivanja mjerne sljedivosti
3. opisati referentni etalon sile KBNM-500 kN te primjenu posredničkih etalona u održavanju sljedivosti
4. provesti umjeravanje referentnog etalona sile posredničkim etalonima sljedećih nazivnih vrijednosti: 50 kN, 100 kN i 500 kN; izvršiti procjenu i proračun mjernih nesigurnosti pri umjeravanju sukladno trenutno važećim normama i uputama
5. analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

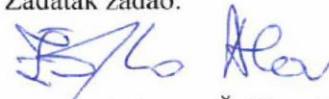
U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
16. studenog 2017.

Datum predaje rada:
18. siječnja 2018.

Predviđeni datum obrane:
24., 25. i 26. siječnja 2018.

Zadatak zadao:


Izv. prof. dr. sc. Željko Alar

Predsjednica Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Biserka Runje

SADRŽAJ

| | |
|---|------|
| POPIS SLIKA | II |
| POPIS TABLICA..... | III |
| POPIS OZNAKA | V |
| POPIS SKRAĆENICA | VII |
| SAŽETAK..... | VIII |
| 1. Uvod | 1 |
| 2. Sila i mjerenje sile | 3 |
| 2.1. Sila kao fizikalna veličina | 5 |
| 2.2. Mjerenje sile..... | 7 |
| 3. Sljedivost mjerenja sile i hijerarhija umjeravanja | 9 |
| 3.1. Općenito o sljedivosti..... | 9 |
| 3.2. Hijerarhija umjeravanja etalona sile | 11 |
| 3.2.1. Etaloni sile | 12 |
| 3.2.2. Sljedivost etalona sile | 13 |
| 3.3. Sljedivost LIMS-a | 14 |
| 4. Mjerna nesigurnost | 16 |
| 4.1. Pogreška zbog ponovljivosti | 17 |
| 4.2. Pogreška zbog obnovljivosti | 18 |
| 4.3. Preciznost i točnost | 19 |
| 4.4. Normizacija..... | 20 |
| 5. Oprema za umjeravanje etalona sile | 21 |
| 5.1. Referentni etalon sile KBNM-500kN | 21 |
| 5.2. Posrednički etaloni sile Z4A za umjeravanje referentnog etalona sile | 23 |
| 5.3. Mjerno pojačalo DPM40..... | 25 |
| 6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA..... | 27 |
| 6.1. Plan eksperimentalnog rada | 27 |
| 6.1.1. Provedba postupka umjeravanja | 28 |
| 6.1.2. Podjela ispitivanja u 3 faze | 29 |
| 6.1.3. Programiranje ciklusa umjeravanja..... | 32 |
| 6.2. Model procjene proračuna pogrešaka i mjernih nesigurnosti | 34 |
| 6.2.1. Proračun relativnih pogrešaka umjeravanja posredničkih etalona..... | 35 |
| 6.2.2. Proračun mjerne nesigurnosti umjeravanja posredničkih etalona..... | 38 |
| 6.3. Obrada rezultata i analiza..... | 43 |
| 6.3.1. Vrijednosti X_{wr} i X_r i usporedba s mjerenjima iz UME | 44 |
| 6.3.2. Vrijednosti ponovljivosti (b'), obnovljivosti (b), interpolacije (f_c) i histereze (v) | 52 |
| 6.3.3. Vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti u ovisnosti o sili..... | 61 |
| 7. ZAKLJUČAK..... | 64 |
| 8. LITERATURA | 65 |
| PRILOZI..... | 67 |

POPIS SLIKA

| | |
|--|----|
| Slika 1 Isaac Newton [1] | 3 |
| Slika 2 Prikaz resultantne sile [5] | 6 |
| Slika 3 Prikaz sila na istom pravcu | 6 |
| Slika 4 Piramida sljedivosti etalona i organizacijska podjela za utvrđivanje sljedivosti [9] | 9 |
| Slika 5 Općeniti prikaz lanca sljedivosti [11] | 10 |
| Slika 6 Hijerarhija umjeravanja etalona sile [12] | 11 |
| Slika 7 Shema sljedivosti etalona sile i pripadajuće mjerne nesigurnosti [12] | 14 |
| Slika 8 Piramida sljedivosti za mjernu veličinu sile u Hrvatskoj | 15 |
| Slika 9 Mjerna nesigurnost na brojevnom pravcu [7] | 16 |
| Slika 10 Pogreška zbog ponovljivosti [11] | 17 |
| Slika 11 Pogreška obnovljivosti promjenom mjeritelja [11] | 18 |
| Slika 12 Razlika između točnog i preciznog [11] | 19 |
| Slika 13 Preciznost u uvjetima ponovljivosti i obnovljivosti [11] | 19 |
| Slika 14 Referentni etalon sile LIMS-a [16] | 21 |
| Slika 15 Idealizirani prikaz ponašanja sustava za mjerenje sile [9] | 23 |
| Slika 16 Posrednički etalon sile Z4A [19] | 23 |
| Slika 17 Raspored DMS traka u Wheatstonovom mostu [12] | 24 |
| Slika 18 Mjerno pojačalo DPM40 | 25 |
| Slika 19 Shematski prikaz opterećenja u 1. fazi eksperimentalnog rada | 29 |
| Slika 20 Shematski prikaz opterećenja u 2. fazi eksperimentalnog rada | 30 |
| Slika 21 Shematski prikaz opterećenja u 3. fazi eksperimentalnog rada | 31 |
| Slika 22 Upisivanje naredba u Notepadu | 32 |
| Slika 23 Mjerna skala za ograničenje opterećenja | 34 |
| Slika 24 Postotno odstupanje treće faze u odnosu na UME za 50 kN | 46 |
| Slika 25 Postotno odstupanje treće faze u odnosu na UME za 100 kN | 48 |
| Slika 26 Postotno odstupanje treće faze u odnosu na UME za 500 kN | 51 |
| Slika 27 Usporedba pogrešaka treće faze i UME-a za 50 kN | 54 |
| Slika 28 Usporedba pogrešaka treće faze i UME-a za 100 kN | 57 |
| Slika 29 Usporedba pogrešaka treće faze i UME-a za 500 kN | 60 |
| Slika 30 Usporedba mjerne nesigurnosti | 63 |

POPIS TABLICA

| | |
|--|----|
| Tablica 1 Ovisnost preciznosti mjerenja sile o mehanizmu opterećenja [8]..... | 8 |
| Tablica 2 Karakteristike referentnog etalona sile LIMS-a [16] | 22 |
| Tablica 3 Naredbe sa značenjima za programiranje uređaja..... | 33 |
| Tablica 4 Maksimalna dopuštena vrijednost pojedinih parametara u skladu s klasom posredničkog etalona sile [20]..... | 35 |
| Tablica 5 Vrijednosti X_{wr} prve i druge faze za 50 kN | 44 |
| Tablica 6 Vrijednosti X_{wr} i X_r treće faze za 50 kN | 45 |
| Tablica 7 Vrijednosti X_{wr} prve i druge faze za 100 kN | 46 |
| Tablica 8 Vrijednosti X_{wr} i X_r treće faze za 100 kN | 47 |
| Tablica 9 Vrijednosti X_{wr} prve i druge faze za 500 kN | 49 |
| Tablica 10 Vrijednosti X_{wr} i X_r treće faze za 500 kN | 50 |
| Tablica 11 Vrijednosti ponovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz prve i druge faze za 50 kN | 52 |
| Tablica 12 Vrijednosti ponovljivosti, obnovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz treće faze za 50 kN | 53 |
| Tablica 13 Vrijednosti ponovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz prve i druge faze za 100 kN | 55 |
| Tablica 14 Vrijednosti ponovljivosti, obnovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz treće faze za 100 kN | 56 |
| Tablica 15 Vrijednosti ponovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz prve i druge faze za 500 kN | 58 |
| Tablica 16 Vrijednosti ponovljivosti, obnovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz treće faze za 500 kN | 59 |
| Tablica 17 Proširena mjerna nesigurnost za 50 kN | 61 |
| Tablica 18 Proširena mjerna nesigurnost za 100 kN | 62 |
| Tablica 19 Proširena mjerna nesigurnost za 500 kN | 62 |
| Tablica 20 Rezultati mjerenja 1. faze za 50 kN | 67 |
| Tablica 21 Rezultati mjerenja 1. faze za 100 kN | 67 |
| Tablica 22 Rezultati mjerenja 1. faze za 500 kN | 68 |
| Tablica 23 Rezultati mjerenja 2. faze za 50 kN | 68 |

| | |
|---|----|
| Tablica 24 Rezultati mjerenja 2. faze za 100kN | 69 |
| Tablica 25 Rezultati mjerenja 2. faze za 500 kN | 70 |
| Tablica 26 Rezultati mjerenja 3. faze za 50 kN | 71 |
| Tablica 27 Rezultati mjerenja 3. faze za 100 kN | 72 |
| Tablica 28 Rezultati mjerenja 3. faze za 500 kN | 73 |

POPIS OZNAKA

| Oznaka | Mjerna jedinica | Opis |
|------------|-------------------|-------------------------------|
| F | N | sila |
| m | kg | masa |
| a | m/s ² | akceleracija |
| R | N | rezultantna sila |
| R_e | N/mm ² | granica razvlačenja |
| R_p | N/mm ² | konvencionalna g. razvlačenja |
| R_m | N/mm ² | vlačna čvrstoća |
| A | % | istezljivost |
| Z | % | kontrakcija |
| E | N/mm ² | modul elastičnosti |
| k | 1 | faktor pokrivanja |
| b | % | pogreška obnovljivosti |
| b' | % | pogreška ponovljivosti |
| f_c | % | pogreška interpolacije |
| f_0 | % | pogreška nule |
| i_0 | mV/V | očitanje prije opterećenja |
| K | °C ⁻¹ | temperaturni koeficijent |
| v | % | pogreška histereze |
| ΔT | °C | temperaturni raspon |
| X_r | mV/V | očitanja niza s roacijom |
| X_{wr} | mV/V | očitanja niza bez rotacije |
| W | 1 | proširena mjerna nesigurnost |
| w_c | 1 | sastavljena nesigurnost |
| w_1 | 1 | nesigurnost primjenjene sile |
| w_2 | 1 | nesigurnost obnovljivosti |

| | | |
|-----------|---|---------------------------|
| w_3 | 1 | nesigurnost ponovljivosti |
| w_4 | 1 | nesigurnost rezolucije |
| w_5 | 1 | nesigurnost puzanja |
| w_6 | 1 | nesigurnost nule |
| w_7 | 1 | temperaturna nesigurnost |
| w_8 | 1 | nesigurnost interpolacije |
| w_{rev} | 1 | nesigurnost histereze |

POPIS SKRAĆENICA

| Skraćenice | Značenje |
|-------------------|---|
| FSB | Fakultet strojarstva i brodogradnje |
| LIMS | Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava |
| PTB | Physikalisch Technische Bundesanstalt |
| UME | Ulusal Metroloji Enstitüsü |
| TS | Transfer standards (posrednički etaloni) |
| GTM | Gassmann Theiss Messtechnik |
| KBNM | Kraft-Bezugs-Normalmesseinrichtung |

SAŽETAK

U ovom radu obrađeno je umjeravanje referentnog etalona sile KBNM – 500 kN koji se nalazi u akreditiranom Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Teorijski je obrađeno općenito značenje sile i njezino mjerenje, položaj LIMS-a u lancu sljedivosti etalona sile i oprema potrebna za umjeravanje. U eksperimentalnom dijelu rada provedena su mjerenja na posredničkim etalonima sile nazivnih vrijednosti 50 kN, 100 kN i 500 kN u 3 različite faze mjerenja. Napravljena je usporedba rezultata među fazama i usporedba rezultata s mjerenjima drugih laboratorija. Napravljen je proračun mjerne nesigurnosti i doneseni su zaključci o preciznosti i točnosti provedenih mjerenja.

Ključne riječi: LIMS, etalon sile, umjeravanje, međulaboratorijske usporedbe, preciznost i točnost

SUMMARY

In this work a verification of the reference force standard KBNM – 500 kN has been done. KBNM – 500 kN is located in the accredited Laboratory for examination of mechanical properties (LIMS), on Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture in Zagreb.

The general meaning of force and its measurement, the position of LIMS in the chain of traceability of force standards and the equipment required for calibration are theoretically described. In the experimental part of this work, measurements of the transfer force standards of nominal values 50 kN, 100 kN and 500 kN have been done in 3 different measurement phases. A comparison of the results between the phases and comparison of the results with the measurements of other laboratories have been done, as well as a calculation of uncertainty and conclusions about precision and accuracy of the performed measurement.

Key words: LIMS, force standards, calibration, interlaboratory comparisons, precision and accuracy

1. Uvod

Sila i mjerenje sile vrlo je bitno u strojarstvu. Proračuni nosivosti, maksimalna opterećenja i pouzdanost rezultata od velike su važnosti za sigurnost u primjeni. Primjena je vrlo široka. Silom se može uspostaviti gibanje tijela, gurati ga ili vući, mijenjati mu položaj, brzinu ili oblik. S druge strane, reaktivne sile iz proračuna govore o dopuštenom opterećenju i daju garanciju za sigurnu upotrebu. Sila se javlja u međudjelovanju tijela ili okoline na tijelo. Iz takvog međudjelovanja može se doći do zaključka o svojstvima materijala tijela. Upravo te činjenice potiču znanstvenike da se bave istraživanjem sile. Jedan od predvodnika istraživačkog rada o sili je engleski fizičar, matematičar i astronom Isaac Newton prema kojem je sila dobila jedinicu njutn (oznaka: N).

Za definiranje jedinične vrijednosti koriste se etaloni. Etaloni mogu biti prihvaćeni uz određenu mjernu nesigurnost što definira njihovu poziciju u sljedivosti do najvišeg ranga etalona (najmanje pogreške). Nacionalni etalon je najviši rang u sljedivosti i on služi kao referentna vrijednost. Da bi mjerenja bila precizna potrebno ih je izvoditi u kontroliranim uvjetima. Sve što okružuje mjerno mjesto utječe na rezultate ispitivanja (temperatura, tlak, vlažnost zraka, vibracije). Zato se propisuju norme prema kojima se točno definiraju uvjeti u kojima se provodi mjerenje. Među normama nalazi se i norma za umjeravanje instrumenata za mjerenje sile (HRN EN ISO 376) prema kojoj će se provoditi eksperimentalni dio ovog rada.

U ovom radu biti će proveden postupak provjere etalona sile KBNM-500kN koji se nalazi u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava na Fakultetu strojarstva i brodogradnje (umjerni laboratorij na području sile za Hrvatsku). Odredit će se mjerna nesigurnost uz pomoć posredničkih etalona sila koji su umjeravani u nacionalnom institutu UME iz Turske.

TEORIJSKI DIO

2. Sila i mjerenje sile

U cilju boljeg razumijevanja principa rada uređaja za umjeravanje etalona sile potrebno je poznavati temeljne zakone o sili. Na slici 1 prikazan je engleski fizičar, matematičar i astrolog Isaac Newton, koji je osmislio tri glavna zakona o sili godine 1687., koji vrijede i danas. Zakoni su objavljeni u njegovom autorskom djelu: *Philosophiae naturalis principia mathematica* [1].



Slika 1 Isaac Newton [1]

Njegova životna priča opisana je u knjizi Williama Stukeleyja pod nazivom *Memoirs of Newton's Life*. Kao i većina priča uspješnog čovjeka, imao je teško djetinstvo, uz siromaštvo, bez oca, ali veliku želju, ušao je u povijest znanstvenih otkrića. Prekretnica u životu bio mu je poziv od strane Sveučilišta u Cambridgeu gdje su prepoznali njegov intelekt iako je bio povučen i asocijalan. Bio je zaposlen kao profesor. Ustupljen mu je prostor za njegove eksperimente gdje su nastala nova velika otkrića. Osim silom, bavio se svjetlošću i bojama. Dokazao je da bijela svjetlost sadrži cijeli spektar boja. To je uspio uz pomoć staklene prizme [1, 2]. Zapisao je tri zakona o količini gibanja [3].

Newtonovi zakoni količine gibanja [3]:

- **1. Newtonov zakon**

Svako tijelo ostaje u stanju mirovanja ili jednolikog gibanja po pravcu, sve dok vanjske sile ne uzrokuju promjenu tog stanja [3].

Ovaj zakon govori o inerciji tijela. Inercija je unutarnje svojstvo tijela da se opire promjeni gibanja ili mirovanja. Takvo stanje je nemoguće egzaktno dokazati jer uvijek postoji nešto u okolišu što utječe na gibanje promatranog tijela. Čak da se eksperiment provodi u svemiru ne može se tvrditi da na tijelo nema utjecaja neke druge mase. Zbog toga je 1. Newtonov zakon zapravo aksiom i ne može se provesti pokusom [3].

- **2. Newtonov zakon**

Akceleracija tijela posljedica je djelovanja sile na tijelo određene mase. Akceleracija tijela ima smjer sile i razmjerna je sili, a obrnuto razmjerna masi tijela [3].

Ovo je temeljni zakon gibanja. Iz njega proizlazi formula (1.1) koja povezuje silu s masom i akceleracijom.

$$\mathbf{F} = m \times \mathbf{a} \quad (1.1)$$

gdje je:

F – sila, N

m – masa, kg

a – akceleracija, m/s^2

Vidljivo je da se poznavanjem mase kao unutarnjeg svojstva tijela i akceleracije kao vanjskog uzročnika može izračunati sila koja djeluje na to tijelo. Isto tako, poznavanjem mase i sile može se izračunati akceleracija tijela, odnosno predvidjeti gibanje i položaj tijela. Ta činjenica je napravila pomutnju u znanstvenim krugovima nakon čega su filozofi determinizmom došli do zaključka kako je sve unaprijed predodređeno. Naravno, to nije moguće dokazati. Drugi zakon potvrđuje prvi zakon o tromosti tijela. Kada bi tijelo mirovalo ili jednoliko se gibalo, a ubrzanje bi bilo nula, tada bi i sila bila nula [3].

- **3. Newtonov zakon**

Ako jedno tijelo djeluje na drugo tijelo nekom silom, onda istovremeno drugo tijelo djeluje na prvo tijelo jednakom silom suprotnog smjera [3].

U trećem zakonu opisuje se interakcija dvaju tijela. Ako jedno tijelo silom djeluje na drugo tada istom silom, na istom pravcu samo suprotnog smjera djeluje i drugo tijelo na prvo. To se matematički može zapisati kao [3]:

$$F_{12} = -F_{21} \quad (1.2)$$

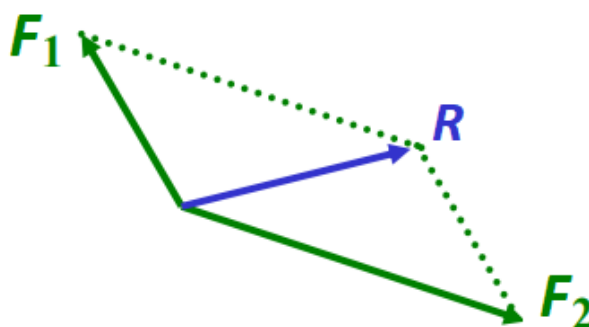
Na kraju, može se zaključiti da niti jedan Newtonov zakon nema „dokaz“ niti matematički izvod. Ovi zakoni opisuju procese koji se stvarno događaju u prirodi i moramo ih prihvatiti kao aksiome. Kombinacijom sva tri zakona moguće je opisati sve fizikalne pojave gibanja i međudjelovanja tijela [3, 4].

2.1. Sila kao fizikalna veličina

Sila je fizikalna veličina koja opisuje mjeru interakcije među tijelima. Označava se slovom F , a jedinicu je dobila prema znanstveniku Newtonu, njutn. Njutn nije među osnovnim jedinicama SI sustava. Što znači da ne postoji dogovorena jedinična vrijednost sile u svijetu kao kod osnovnih SI jedinica (npr. masa, duljina,...). Njutn možemo dobiti kombinacijom osnovnih SI jedinica i to masom, metrom i sekundom na kvadrat. Pa je jedinica za silu [4, 5]:

$$\frac{\text{kg} \times \text{m}}{\text{s}^2} = \text{N} \quad (2.1.)$$

Sila je također i vektorska veličina, što znači da osim iznosa ima i smjer. Ovisno o smjeru, sile možemo zbrajati i oduzimati, te na taj način uspoređivati. Ako više sila djeluje na isto tijelo tada se može odrediti jedna zajednička, resultantna sila koja definira konačan smjer djelovanja svih sila. To je vidljivo na slici 2 [5].



Slika 2 Prikaz rezultantne sile [5]

Na slici 2 prikazane su sile F_1 i F_2 koje djeluju u različitim smjerovima te rezultantna sila R koja konačno definira smjer djelovanja ove dvije sile. Jednostavniji slučaj je kada su sile na istom pravcu. Tada se zna da je i rezultantna sila na tom pravcu. Kada je smjer djelovanja sile poznat ostaje odrediti samo njezin iznos. Na temelju toga omogućuje se direktna usporedba sile. Ugradnjom dodatnih instrumenata koji preciznije određuju iznose sile može se provoditi umjeravanje. Sile na istom pravcu prikazane su na slici 3 [5].



Slika 3 Prikaz sile na istom pravcu

Osim ovih jednostavnih primjera sile prema smjeru djelovanja mogu uzrokovati razna opterećenja na tijelo: tlak, vlak, smik, savijanje, torziju, statičko ili dinamičko opterećenje, kratkotrajno ili dugotrajno opterećenje (puzanje) [6].

Prema uzroku nastajanja razlikuju se sile:

- gravitacijska,
- elektromagnetska i
- nuklearna.

Sile mogu uzrokovati promjene:

- oblika tijela,
- građe tijela ili
- gibanja tijela.

Na temelju promjena nastalih uslijed djelovanja sile mogu se donijeti zaključci o osnovnim značajkama materijala koje definiraju njegovu mehaničku otpornost: granica razvlačenja (R_e) i konvencionalna granica razvlačenja ($R_{p0,01}$, $R_{p0,2}$), vlačna čvrstoća (R_m), istezljivost (A), kontrakcija (Z), modul elastičnosti (E) i dr.. To je vrlo važno za određivanje primjene promatranog tijela (npr. dimenzioniranje konstrukcijskih dijelova) [6].

2.2. Mjerenje sile

Mjerenje sile podrazumijeva određivanje njene veličine i smjera djelovanja. To se može provesti na dva načina [7]:

- direktno ili
- indirektno.

Direktna metoda je najjednostavnija jer se koristi usporedba poznate gravitacijske sile i poznata masa utega. Takvi uređaji nazivaju se još i vage za mjerenje sile, a njihova osjetljivost ovisi o konstrukcijskim parametrima [7].

Indirektna metoda temelji se na mjerenju učinka sile na promatrano tijelo i to na dva načina [7]:

- mjerenjem akceleracije tijela s poznatom masom koje je izloženo djelovanju sile
- mjerenje resultantnog učinka (deformacije) kada se silom djeluje na elastično tijelo

Mjerenje akceleracije tijela s poznatom masom izvedivo je kada nebi bilo utjecaja okolnih sila, odnosno kada bi se znalo koje sve sile utječu na smjer gibanja. Uglavnom je poznata samo resultantna sila što jako ograničuje primjenu ove metode.

Mjerenje resultantnog učinka ima veću primjenu. Djelovanjem sile na elastično tijelo kao što su opruge, jednoosno opterećeni članci, nosači, prstenovi te razne druge vrste i tipovi mjernih ćelija postiže se: veliki raspon mjerenja, mogućnosti kontinuiranog praćenja, jednostavnija uporaba, te njihova otpornost [7]. Princip rada elastičnih elemenata temelji se na deformaciji elemenata uslijed djelovanja sile čiji se pomak pretvara u neki drugi oblik (npr. u napon, mV/V) zbog lakšeg očitavanja nastale deformacije što se detaljnije obrađuje u 5. poglavlju [8].

Osim postupka kojima se mjeri sila potrebno je uzeti u obzir kvalitetu opreme, ali i niz drugih utjecajnih faktora koji direktno utječu na rezultate mjerenja. Preciznost mjerenja postiže se umjeravanjem opreme za mjerenje. I to tako da se za umjeravanje koristi preciznija i točnija oprema nego što je uređaj kojim se izvode mjerenja [9].

Budući da je sila izvedena jedinica nije moguće direktno odrediti jediničnu silu od 1N (njutn) nego se to radi preko etalona mase i gravitacije. Iznos gravitacije se može odrediti s nesigurnošću 1×10^{-6} iz čega proizlazi najveća mjerna sposobnost uređaja za mjerenje sile. Prema mehanizmu opterećenja određene su najveće mjerne sposobnosti uređaja prikazane u tablici 1 [9].

Tablica 1 Ovisnost preciznosti mjerenja sile o mehanizmu opterećenja [8]

| Tipovi referentnih etalona prema mehanizmu opterećivanja | Najbolja mjerna sposobnost (proširena relativna mjerna nesigurnost) |
|--|---|
| Mehanizam opterećivanja direktno utezima | $5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$ |
| Hidraulički mehanizam opterećivanja | $1 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$ |
| Polužni mehanizam opterećivanja | $1 \times 10^{-4} - 5 \times 10^{-4}$ |
| Komparatorni sustav | 5×10^{-4} do 5×10^{-3} |

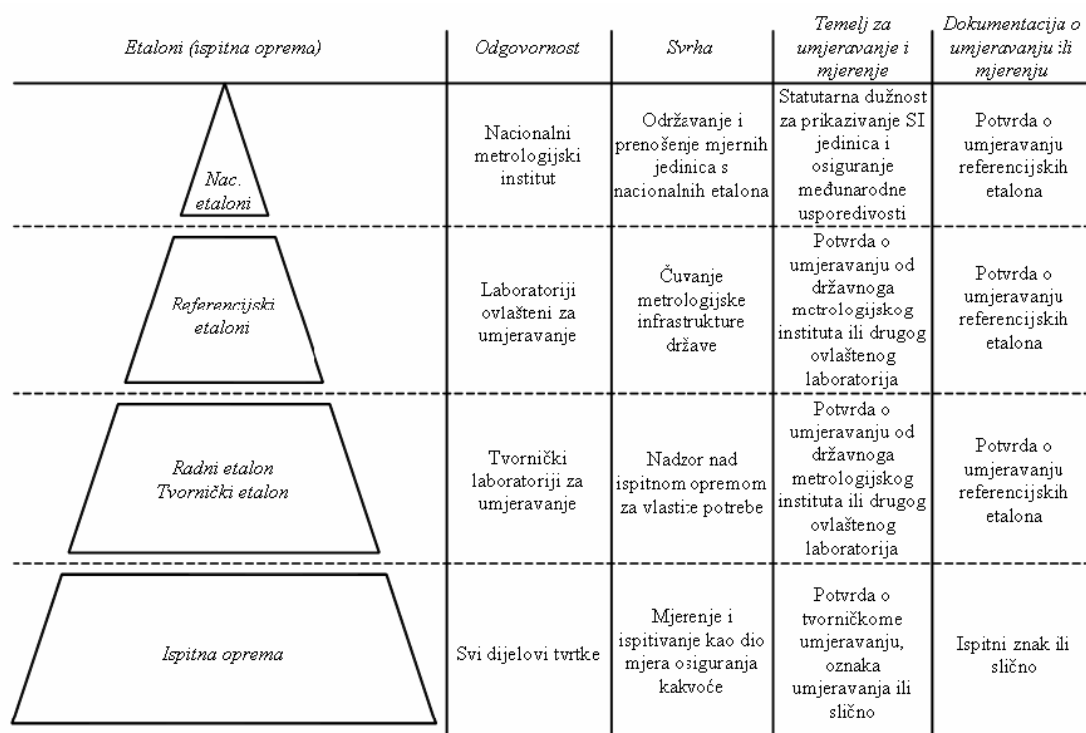
Najveća mjerna sposobnost (preciznost) postiže se opterećenjem direktno utezima $5 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-4}$. Takvi uređaji prozvani su još i primarni nacionalni etaloni sile (Force standard machines – FSM). Preciznost te mjere u praksi nije potrebna jer bi bila preskupa pa takvi uređaji služe isključivo za umjeravanje, odnosno prijenos i očuvanje veličine za uređaje niže klase [9].

3. Sljedivost mjerenja sile i hijerarhija umjeravanja

3.1. Općenito o sljedivosti

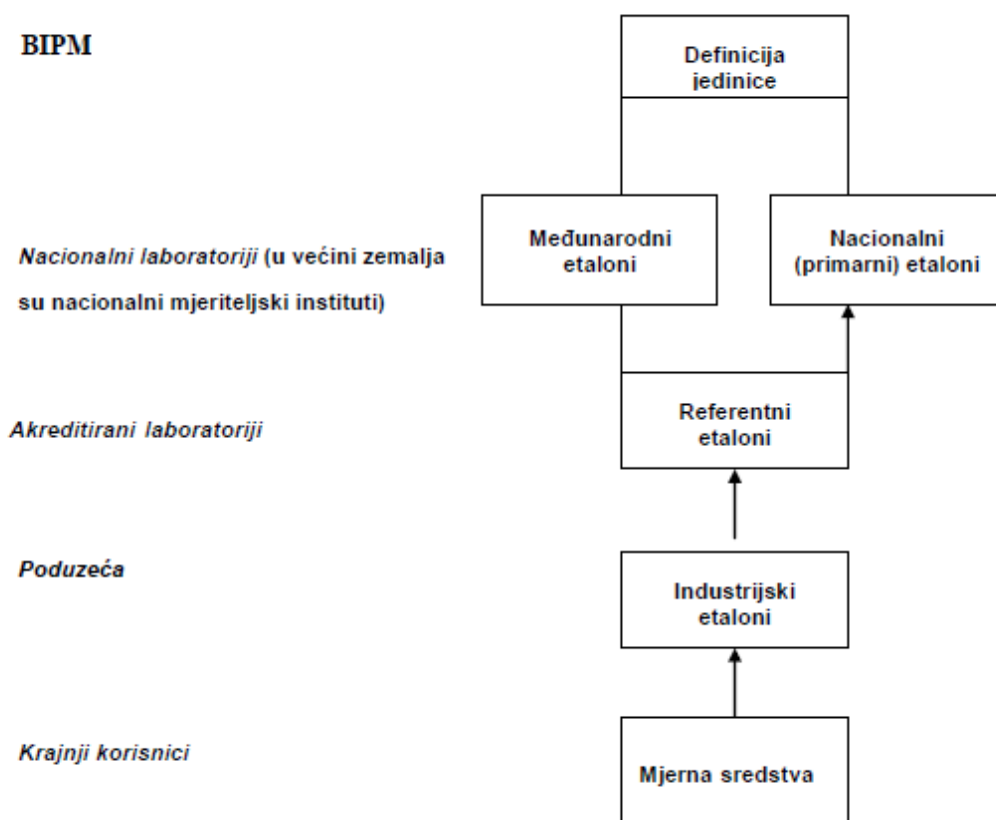
Sljedivost je svojstvo mjernog rezultata kojim se rezultat dovodi u vezu s navedenim referencijskim etalonima (državnim ili međunarodnim) korištenjem neprekinutih lanaca umjeravanja od kojih svako umjeravanje dopirnosi utvrđenoj mjernoj nesigurnosti. Lanac sljedivosti je neprekidan lanac usporedba, a svaka usporedba ima svoju utvrđenu mjernu nesigurnost. Mjerna nesigurnost povećava se prelaskom na nižu razinu što uzrokuje veće pogreške pri mjerenju. Mjerni rezultat ili vrijednost etalona uzima se uz pogrešku koja se određuje na temelju povezanosti s referentnim etalonima na višoj mjeriteljskoj razini. Cilj je povezati mjerilo za silu s primarnim etalonom sile [7].

Neprekinuti lanac usporedbi koji osigurava sljedivost određuje i shemu, tj. piramidu sljedivosti. U toj piramidi etaloni i mjerni uređaji posloženi su hijerarhijski prema svojoj mjeriteljskoj kakvoći. Pomoću etalona više razine umjerava se etalon niže razine i tako sve do mjerila i ispitne opreme kao što je npr. kidalica, koja je na najnižoj razini piramide. Dakle, umjeravanje ide s vrha prema dnu piramide. Piramida sljedivosti prikazana je slikom 4 [7, 9].



Slika 4 Piramida sljedivosti etalona i organizacijska podjela za utvrđivanje sljedivosti [9]

Pojednostavljeno, sljedivost ne obuhvaća samo tehničke mjere poput umjeravanja, već uključuje sve elemente i aktere koji sudjeluju u dobivanju rezultata, a na temelju kojih se postiže pouzdanost rezultata (odgovarajuća mjerna nesigurnost). Općenito bi to značilo da se sljedivošću uvijek dolazi do definicije jedinične vrijednosti prema shemi na slici 5 [11].



Slika 5 Općeniti prikaz lanca sljedivost [11]

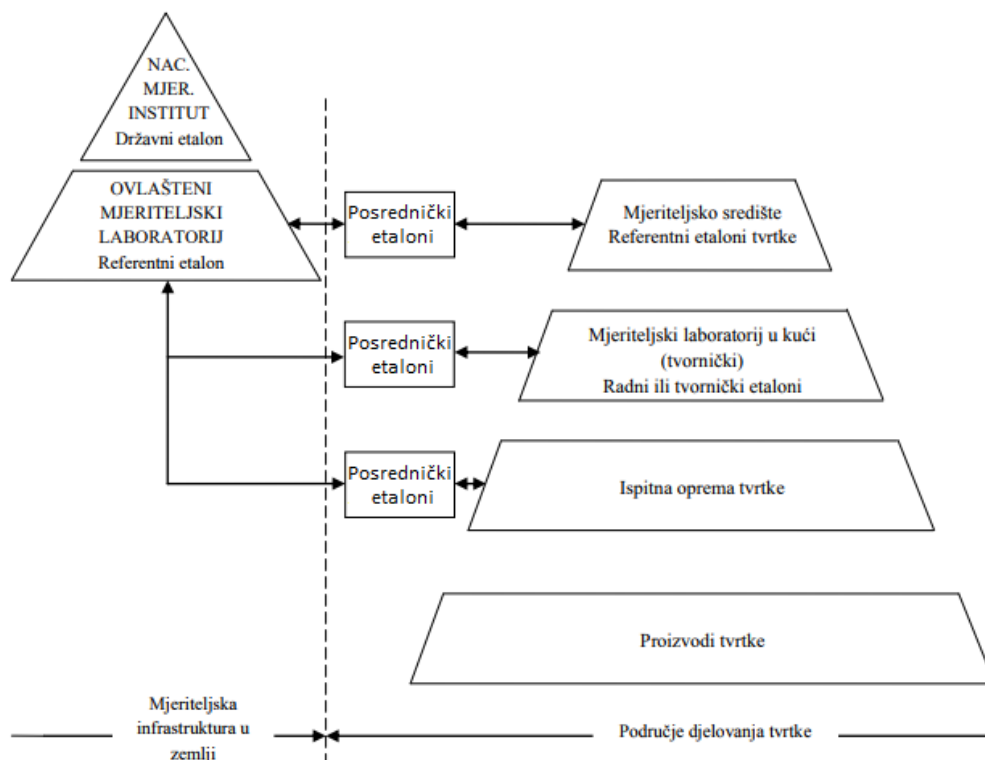
Definicijski etaloni su samostalni etaloni s visokim stupnjem ponovljenosti, a zasnivaju se na fizikalnim zakonima, temeljnim prirodnim aksiomima ili nepromjenjivim svojstvima materijala. Laboratorij koji ih upotrebljavaju moraju prikazati svoje tehnike osiguranja kakvoće, sudjelovati u međulaboratorijskim usporedbama ili na neki drugi način dokazati da rezultati koreliraju s nacionalnim ili međunarodnim etalonima [11].

Osnovni elementi koji određuju sljedivost su [7]:

- neprekinuti lanac usporedbi kojim se može doći do etalona najviše mjeriteljske kakvoće,
- mjerna nesigurnost (izračunata za svaki dio lanca te za čitav lanac),
- dokumentacija za svaki korak u lancu,
- mjerodavnost laboratorija i tijela koji provode neke korake u lancu mora biti potkrijepljena dokazima,
- upućivanje na SI jedinice,
- ponovna umjeravanja u određenim vremenskim periodima.

3.2. Hijerarhija umjeravanja etalona sile

Hijerarhija umjeravanja mjernih instrumenata polazi od tvrtke pa do nacionalnog mjernog instituta. Prema slici 8 je vidljivo da postoji nekoliko otvorenih varijanti umjeravanja unutar pojedine tvrtke do ovlaštenog mjeriteljskog laboratorija (referentni etalon), a tvrtka može sama odlučiti koja metoda joj najviše odgovara [10, 12].



Slika 6 Hijerarhija umjeravanja etalona sile [12]

Oprema i mjerni etaloni moraju biti umjereni od [7]:

- nacionalnog mjeriteljskog instituta,
- akreditiranog ovlaštenog mjeriteljskog laboratorija kojeg je akreditiralo akreditacijsko tijelo,
- nacionalnog mjeriteljskog instituta za kojeg je akreditacijsko tijelo uspostavilo pravila za priznavanje mjeriteljske sljedivosti,
- umjerenog laboratorija za kojeg je akreditacijsko tijelo uspostavilo pravila za priznavanje mjeriteljske sljedivosti.

3.2.1. Etaloni sile

Mjerni etalon je stvarna mjera, mjerilo, referentna tvar ili mjerni sustav namijenjen za određivanje, ostvarivanje, čuvanje ili obnavljanje jedinice jedne ili više vrijednosti neke veličine kako bi mogao poslužiti kao referenca. Etaloni se mogu podijeliti prema razinama na [11]:

- Međunarodni mjerni etalon – etalon priznat međunarodnim dogovorom da bi služio kao međunarodna osnova za dodjeljivanje vrijednosti drugim etalonima određene veličine.
- Državni (nacionalni) mjerni etalon – mjerni etalon priznat odlukom državne vlasti da služi u toj državi ili gospodarstvu kao temelj za dodjelu vrijednosti veličine drugim mjernim etalonima za dotičnu vrstu veličine.
- Primarni mjerni etalon – mjerni etalon uspostavljen uporabom primarnog mjernog postupka ili stvoren kao predmet odabran dogovorom, najviša mjeriteljska kakvoća
- Sekundarni mjerni etalon – mjerni etalon uspostavljen umjeravanjem u odnosu na primarni mjerni etalon za veličinu iste vrste.
- Referentni mjerni etalon – mjerni etalon određen umjeravanje drugih mjernih etalona za veličine dane vrste u danoj organizaciji ili na danoj lokaciji.
- Radni mjerni etalon – mjerni etalon koji se redovito upotrebljava za umjeravanje ili ovjeravanje mjerila ili mjernih sustava.
- Prijenosni mjerni etalon – mjerni etalon, često posebne konstrukcije, koji je namijenjen za prijenos na različita mjesta.

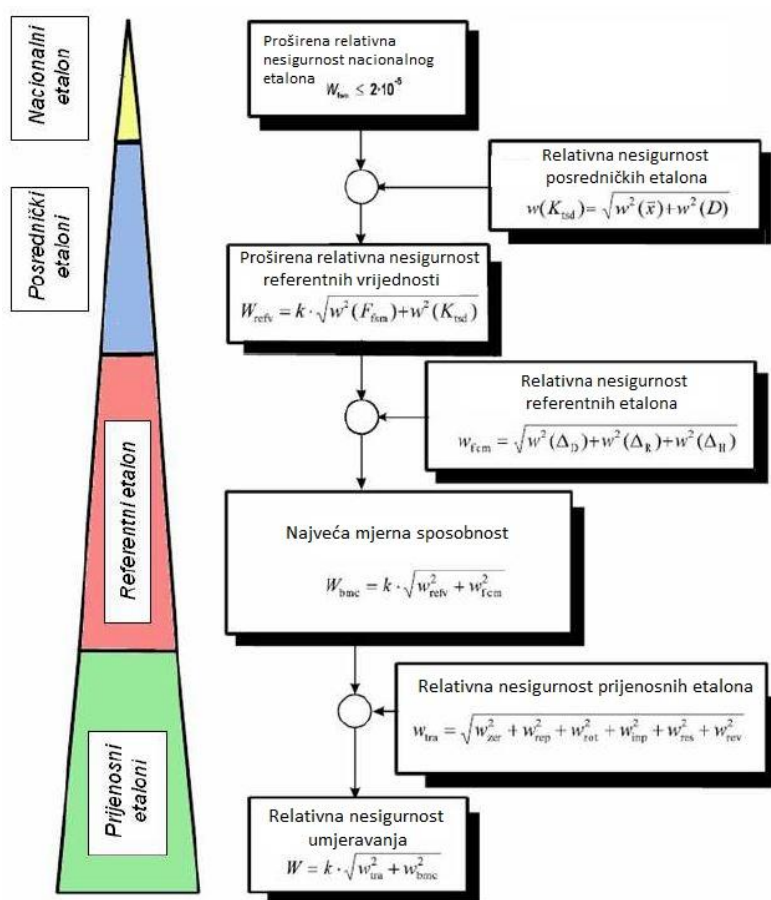
- Posrednički mjerni etalon – mjerni etalon koji se upotrebljava kao posrednik za usporedbu veličine među laboratorijima (veće točnosti od prijenosnog etalona).

Radni etaloni mogu biti istodobno i referentni etaloni. To je posebno slučaj za radne etalone koji se izravno umjeravaju prema etalonima nacionalnih mjeriteljskih instituta. Isto tako posrednički etaloni često su istodobno i prijenosni etaloni. Svaki etalon mora imati svoje mjesto u piramidi sljedivosti te se mora direktnim lancem usporedbi povezati sa primarnim etalom [7].

3.2.2. Sljedivost etalona sile

Sljedivost među-laboratorijskih etalona sile obzirom na pripadajuću nesigurnost svrstani su prema razinama kao na slici 7 na:

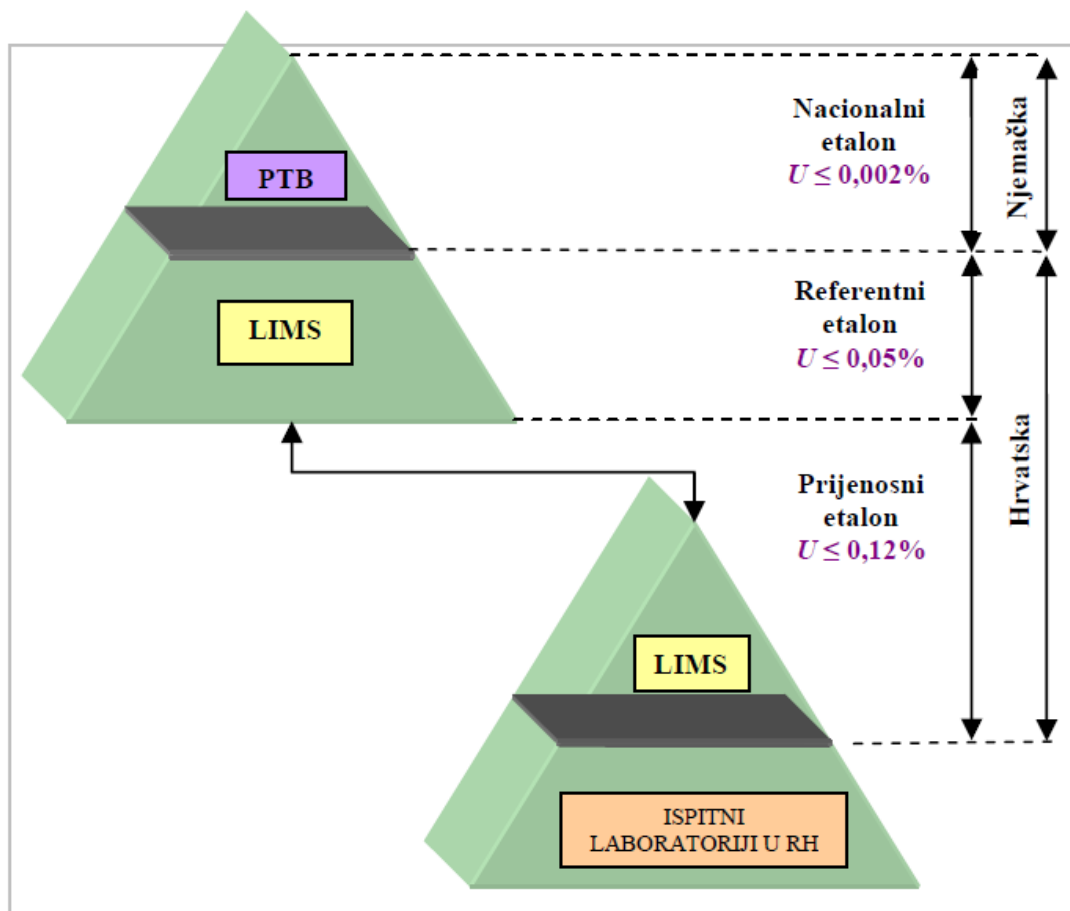
- Nacionalni etaloni,
- Posrednički etaloni,
- Referentni etaloni,
- Prijenosni etaloni.



Slika 7 Shema sljedivosti etalona sile i pripadajuće mjerne nesigurnosti [12]

3.3. Sljedivost LIMS-a

U lancu sljedivosti etalona sile nalazi se Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) koji je smješten na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. LIMS održava sljedivost državnih etalona umjeravanjem vlastitih etalona u međunarodnom laboratoriju PTB (Physikalisch Technische Bundesanstalt, Njemačka). Na slici 6 prikazan je položaj LIMS-a u piramidi sljedivosti [12].

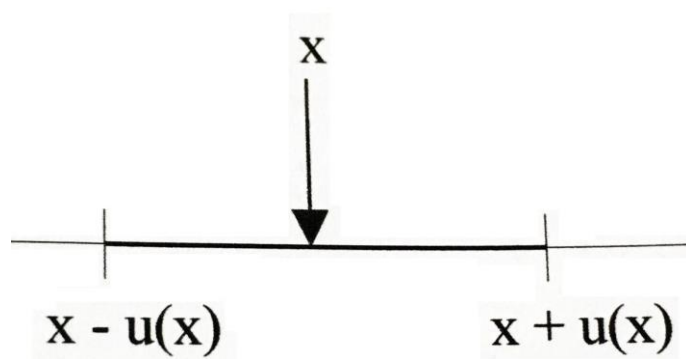


Slika 8 Piramida sljedivosti za mjernu veličinu sile u Hrvatskoj
s pripadnim proširenim mjernim nesigurnostima [12]

Referentni etaloni su stabilni uređaji za mjerenje sile, a nalaze se u akreditiranim umjernim laboratorijima te tako ostvaruju mjernu sljedivost između nacionalnog etalona i ostalih uređaja za mjerenje sile na nekom području. Umjerni laboratoriji imaju mjernu nesigurnost manju ili jednaku od 0,05% ($U \leq 0,05$) [7].

4. Mjerna nesigurnost

Mjerna nesigurnost je parametar pridružen rezultatu mjerenja koji opisuje rasipanje vrijednosti koje bi se razumno mogle pripisati mjerenoj veličini. Riječ "nesigurnost" znači sumnju i, prema tome, u najširem smislu "mjerna nesigurnost" znači sumnju u valjanost mjernog rezultata. Na slici 9 prikazana je mjerna nesigurnost rezultata na brojevnom pravcu [11].



Slika 9 Mjerna nesigurnost na brojevnom pravcu [7]

X označava mjerenu veličinu, dok odstupanja $\pm u(x)$ predstavljaju interval oko mjernog rezultata za koji se može očekivati da obuhvaća veliki dio razdiobe vrijednosti koje se pripisuju mjerenoj veličini. Za proširenu mjernu nesigurnost ta vrijednost je 95% i računa se tako da se mjerna nesigurnost pomnoži s faktorom pokrivanja $k = 2$. Odstupanja su uzrokovana nepoznatim sustavnim djelovanjima, promjenom parametara mjerenja i razinom povjerenja.

Mjernoj nesigurnosti doprinosi i sljedeće [7]:

- nepotpuna definicija mjerene veličine,
- nesavršena realizacija definicije mjerene veličine,
- nedovoljno reprezentativan uzorak mjerenja,
- nedovoljno poznavanje okolišnih uvjeta ili njihovo nesavršeno mjerenje,
- pristranosti mjeritelja,

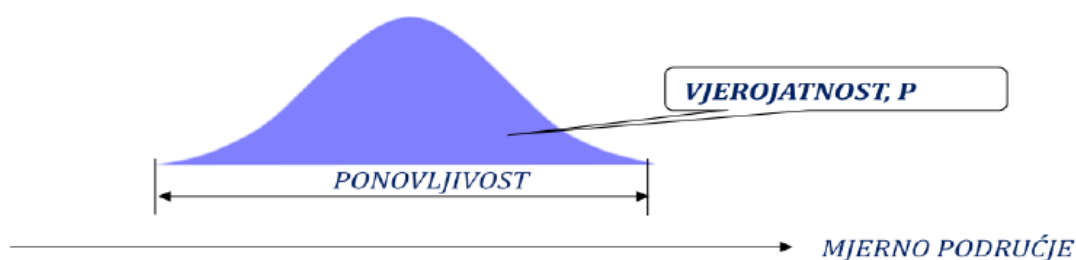
- rezolucija ili prag pokretljivosti mjerila,
- netočne referentne vrijednosti,
- netočne vrijednosti konstanti i drugih parametara,
- aproksimacije i pretpostavke uključene u mjernu metodu i proceduru,
- varijacije u ponovljenim mjerenjima pod istovjetnim uvjetima.

4.1. Pogreška zbog ponovljivosti

Ponovljivost je usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u istim mjernim uvjetima koji uključuju [11]:

- isti mjerni postupak,
- istog mjeritelja,
- isto mjerilo upotrebljavano u istim uvjetima,
- isto mjerno mjesto,
- ponavljanje u kratkom vremenu.

Ponovljivost se može izraziti količinski s pomoću značajki rasipanja rezultata mjerenja. Ponovljivost u najvećoj mjeri određuje utjecaj mjerila u varijaciji mjernog sustava. Pogreška zbog ponovljivosti može se prikazati normalnom razdiobom vjerojatnosti kao na slici 10.



Slika 10 Pogreška zbog ponovljivosti [11]

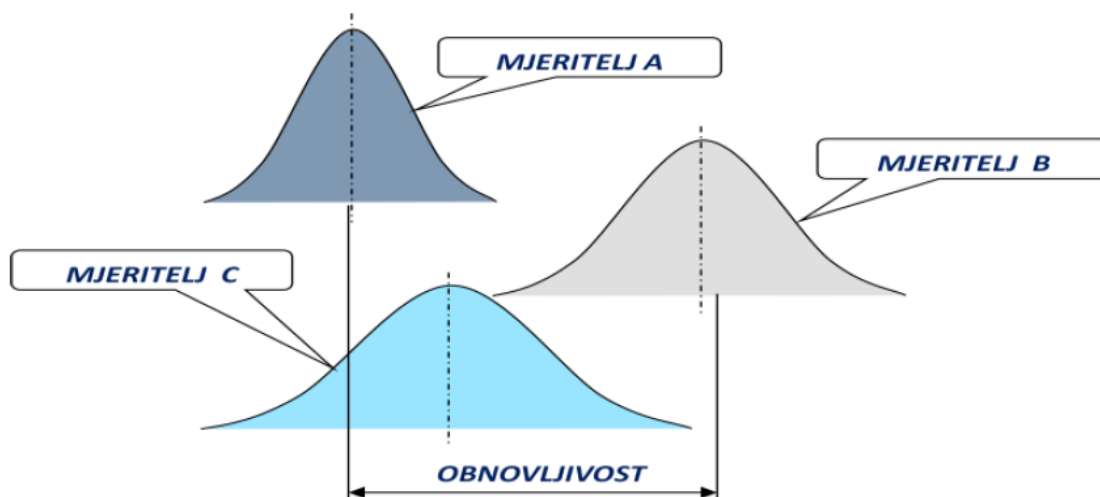
4.2. Pogreška zbog obnovljivosti

Obnovljivost je rasipanje rezultata dobivenog od većeg broja mjeritelja kod ponovljenih mjerenja iste karakteristike (npr. sile) na istim ili sličnim predmetima uz korištenje istih ili različitih mjernih instrumenata i mjernih postupaka. Obnovljivost se može izraziti količinski s pomoću značajki rasipanja rezultata mjerenja. Obnovljivost u najvećoj mjeri određuje utjecaj mjeritelja u varijaciji mjernog sustava [11].

Promijenjeni uvjeti mogu uključivati [12]:

- mjerno načelo,
- mjernu metodu,
- mjeritelja,
- mjerni instrument,
- referentni etalon,
- mjesto, uvjete uporabe, vrijeme.

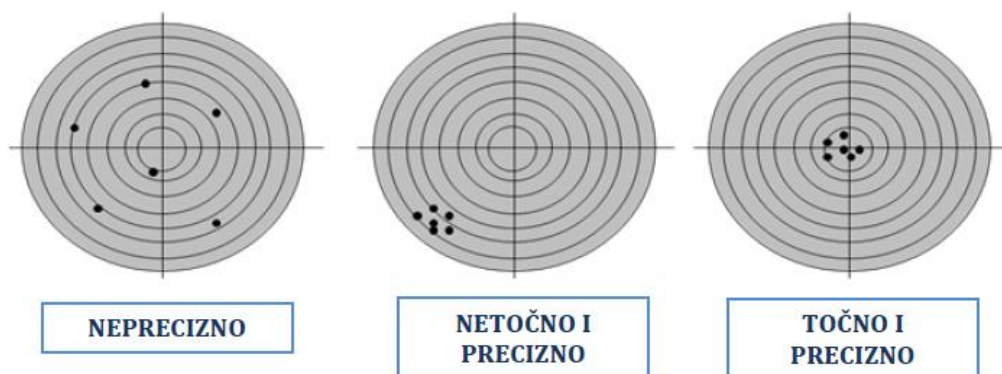
Kod određivanja obnovljivosti važno je da se točno navedu promijenjeni uvjeti, npr. mjeritelj kako je prikazano na slici 11.



Slika 11 Pogreška obnovljivosti promjenom mjeritelja [11]

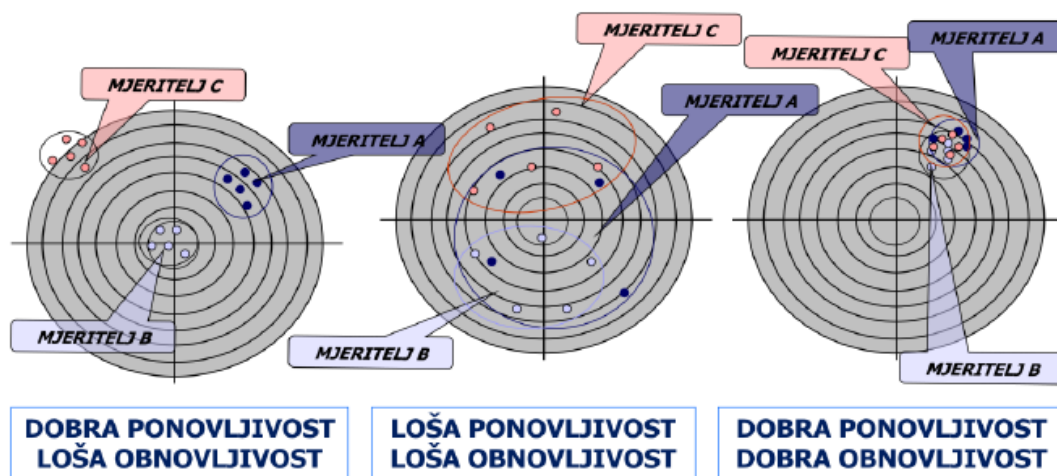
4.3. Preciznost i točnost

Točnost i preciznost su dva veoma značajna termina u mjeriteljstvu i najčešće se javljaju zajedno. Točnost i preciznost, odnosno netočnost i nepreciznost grafički su prikazani na slici 12



Slika 12 Razlika između točnog i preciznog [11]

U slučaju loše preciznosti ne može se govoriti o točnosti. No, ako su rezultati grupirani, odnosno precizno pozicionirani unutar nekog područja potrebno je provjeriti jesu li točni. Točnost se definira udaljenošću od stvarne mjere. Kada bi se to povezalo s ponovljivosti i obnovljivosti, preciznost mjeritelja bi bila ponovljivost, a grupiranost svih mjeritelja bi bila obnovljivost. Preciznost u uvjetima ponovljivosti i obnovljivosti prikazana je na slici 13 [11].



Slika 13 Preciznost u uvjetima ponovljivosti i obnovljivosti [11]

4.4. Normizacija

Norma je dokument donesen konsenzusom i odobren od priznatoga tijela, koji za opću i višekratnu uporabu daje pravila, upute ili značajke za djelatnosti ili njihove rezultate radi postizanja najboljeg stupnja uređenosti u danome kontekstu. Norme se temelje na provjerenim znanstvenim, tehničkim i iskustvenim rezultatima [13].

Konsenzus je opće slaganje koje se odlikuje odsutnošću čvrstoga protivljenja bitnim sadržajima od strane znatnoga dijela interesnih skupina i procesom u kojem se nastoje uzeti u obzir gledišta svih zainteresiranih strana te uskladiti oprečna stajališta. Pri tome, nije nužno da konsenzus bude jednoglasno donesen [14].

Normom se preporučuju načini ili postupci projektiranja, izrade, ugradnje, održavanja ili uporabe opreme, konstrukcija ili proizvoda. To znači da upute za primjenu mogu biti norme, dio norme ili neovisne o normi. Ovisno o tome olakšava se kooperacija i integracija poduzeća i sporazumijevanje između proizvođača i kupaca [14].

Općenito ciljevi normizacije su [13]:

- osiguranje prikladnosti nekog proizvoda, procesa ili usluge da u određenim uvjetima služi svojoj namjeni,
- ograničavanje raznolikosti izborom optimalnog broja tipova ili veličina,
- osiguravanje spojivosti raznih proizvoda,
- zaštita zdravlja, sigurnosti i okoliša,
- uklanjanje zapreka u trgovini.

5. Oprema za umjeravanje etalona sile

5.1. Referentni etalon sile KBNM-500kN

Referentni etalon sile KBNM – 500 kN nalazi se u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstava (LIMS) na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u sklopu Katedre za materijale i tribologiju Zavoda za materijale. Laboratorij je od osnivanja 1960. godine usmjeren na znanstveno-istraživački rad u suradnji s gospodarstvom. Značajna djelotvornost odvija se na području umjeravanja mjerila sile i tvrdoće. 1990. godine LIMS postaje umjerni laboratorij ovlašten od Državnog Zavoda za Mjeriteljstvo [15].

Referentni etalon sile sukladno normi HRN EN ISO 376 akreditiran je za mjerno područje 50 N – 500 kN. Služi za umjeravanje gdje fakultet radi vlastita ispitivanja umjeravanja posredničkih etalona čime se smanjuju troškovi, ali radi i provjera istih. Omogućena je interkomparacija s drugim nacionalnim laboratorijima, a time i potvrđivanje mjerne sposobnosti koja je manja od 0,05%. Na slici 14 prikazan je referentni etalon sile LIMS-a na kojem je proveden eksperimentalni dio ovog rada [16, 17].



Slika 14 Referentni etalon sile LIMS-a [16]

Karakteristike uređaja prikazane su tablicom 2:

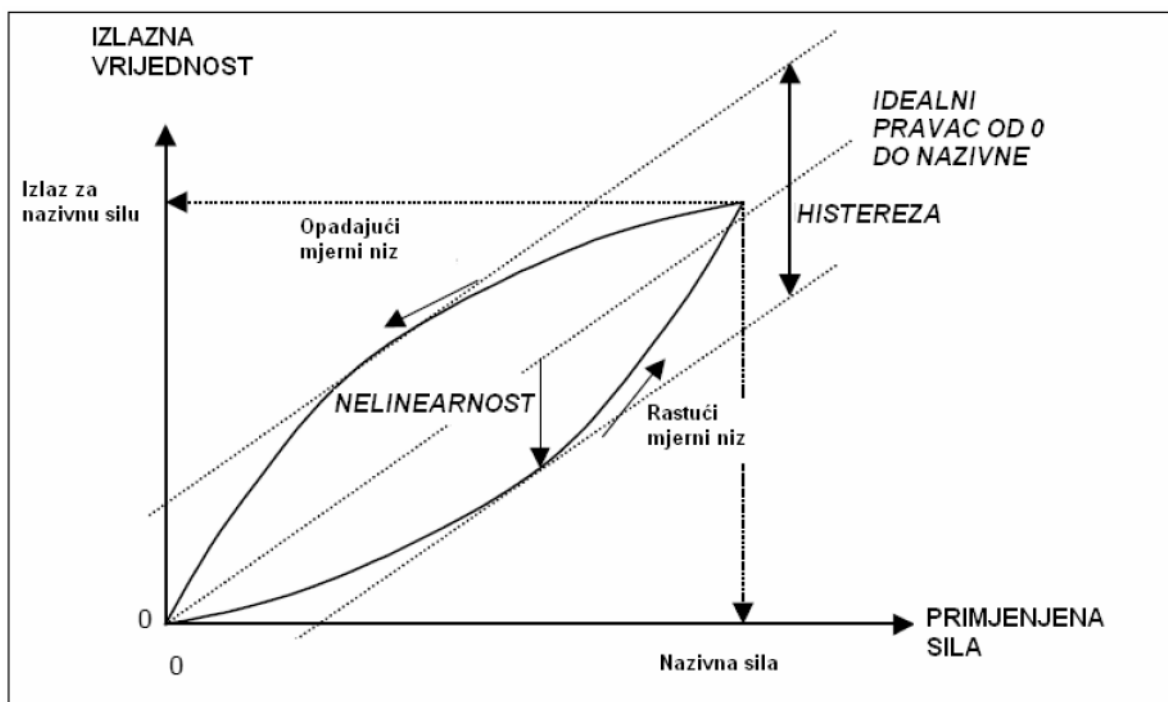
Tablica 2 Karakteristike referentnog etalona sile LIMS-a [16]

| KARAKTERISTIKE REFERENTNOG ETALONA SILE | |
|---|---|
| Proizvođač | GTM, Njemačka |
| Mjerno područje | 10 – 500 kN |
| Nazivna sila | 500 kN |
| Način opterećenja | hidraulički |
| Smjer opterećenja | Vlak, tlak |
| Ponovljivost | 1×10^{-04} |
| Najbolja mjerna sposobnost | < 0,05 % |
| Mjerni sustav | Komparatorni s dvostrukim dinamometrima |

Uređaj je smješten u posebnoj prostoriji s antivibracijskim temeljima zbog izolacije okolišnih utjecaja na mjereni rezultat. Prostor je klimatiziran i konstantno se prati se vlažnost zraka. Mjerenja se provode na $\pm 0,5$ °C zbog čega je obavezna kontrola i regulacija temperature zraka [7, 17].

U toku uporabe uređaji za mjerenje sile gube na svojoj mjeriteljskoj kvaliteti zbog oštećenja, kvarova, preopterećenja, istrošenja dijelova itd. Zbog toga je potrebno vršiti umjeravanje u skladu s normom ISO/IEC 17025 za ispitne i umjerne laboratorije. Na taj način uspoređuju se rezultati različitih mjerenja izvršenih od strane različitih mjeritelja i mjernih uređaja pri čemu svaki rezultat sadrži pripadajuću preciznost mjerila, tj. stupanj nesigurnosti. Na temelju toga radi se usporedba i dobiva se povjerenje u rezultate dobivene od strane laboratorija. Bitno je zadovoljiti sljedivost etalona niže razine s primarnim etalonima najviše mjerne sposobnosti. Za prijenos sile na različita mjesta koriste se posrednički etaloni (TS – transfer standards) [7, 18].

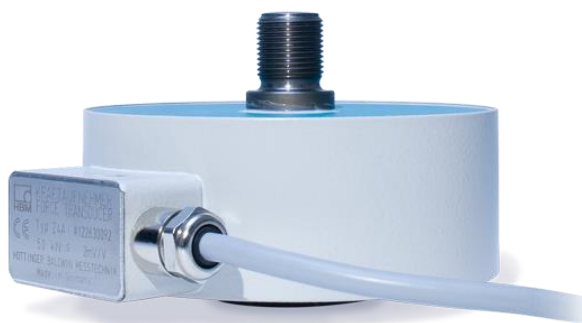
Ispitivanja se mogu provesti na vlak i tlak. U ovom radu rađeno je umjeravanje na tlak. Rezultati se mogu mjeriti za uzlazni i silazni niz opterećenja. Uzlazni od minimalnog opterećenja uređaja do nazivne sile etalona i obratno za silazni niz od nazivnog do minimalnog opterećenja. Uslijed toga javlja se odstupanje pokazivanja rezultata prema slici 15.



Slika 15 Idealizirani prikaz ponašanja sustava za mjerenje sile [9]

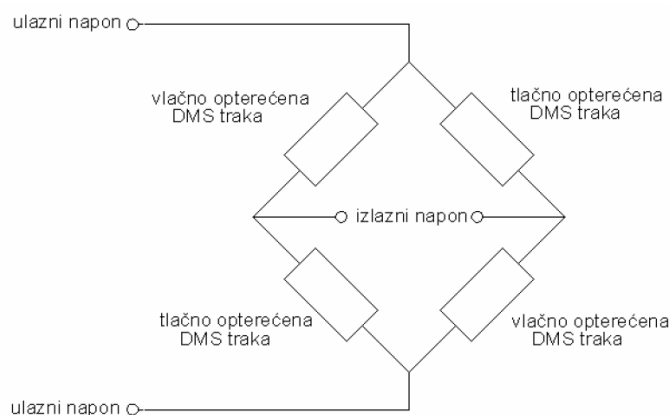
5.2. Posrednički etaloni sile Z4A za umjeravanje referentnog etalona sile

Posrednički etaloni (TS – transfer standards) služi za prijenos sile na različita mjesta. Pomoću njih se radi umjeravanje referentnog etalona u nacionalnom laboratoriju ili umjeravanje etalona niže mjeriteljske razine. Na slici 16 prikazan je posrednički etalon sile Z4A [19].



Slika 16 Posrednički etalon sile Z4A [19]

Princip rada prijenosnog etalona sile zasniva se na pretvorniku sile u električni signal. Djelovanjem sile dolazi do pomaka elastičnog deformacijskog dijela koji je povezan mjernim trakama (DMS trake). Mjerne trake su zavojnice od metalne folije ili trake koje imaju određeni električni otpor. Trake su povezane u Wheatstonov most za vrlo precizno mjerenje malog otpora prema slici 17 [19].



Slika 17 Raspored DMS traka u Wheatstonovom mostu [12]

Promjena otpora proporcionalna je promjeni sile, a promjena napona proporcionalna je promjeni otpora pa je time povezan i napon sa silom. Uslijed deformacije elastičnog dijela mijenja se otpor traka čime se mijenja i izlazni napon na mostu koji se očituje na mjernom pojačalu [19].

5.3. Mjerno pojačalo DPM40

Mjerno pojačalo DPM40 tvrtke HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik, Njemačka) dio je opreme za umjeravanje. Pojačalo je direktno povezano s posredničkim etalomom i služi za očitavanje promjena nastalih unutar etalona. Na slici 18 prikazano je mjerno pojačalo DPM40 koje je korišteno u ovom radu [19].



Slika 18 Mjerno pojačalo DPM40

Izlazni signal na pojačalu izražen je u mV/V. Pojačalo se koristi za visoko precizna mjerenja mehaničkih veličina (sila, moment). Razlog tome su visoke mjeriteljske karakteristike koje uključuju [19]:

- stabilnost signala (filter 0,1 HzBe),
- visoku točnost i preciznost ($< 0,005\%$),
- visoku rezoluciju očitavanja (šest decimalnih mjesta).

EKSPERIMENTALNI DIO

6. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

6.1. Plan eksperimentalnog rada

Provedena je provjera referentnog etalona sile komparatornog tipa posredničkim etalonima tipa Z4A nazivnih vrijednosti: 50 kN, 100 kN i 500kN opterećenih na tlak. Na temelju rezultata dobivenih u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva na Fakultetu strojarstva i brodogradnje napravljen je proračun relativnih pogrešaka i mjernih nesigurnosti prema trenutno važećoj normi HRN ISO 376:2012 i radnim uputama laboratorija. [20]

Prema tijeku opterećenja ispitivanja su podijeljena u 3 faze. U prvoj fazi uzimaju se očitavanja samo uzlaznih nizova, bez rotacije. U drugoj fazi bilježe se očitavanja uzlazno-silaznih nizova, bez rotacije. U trećoj fazi bilježe se očitavanja uzlazno-silaznih nizova, ali se radi i rotacija među njima. Rezultati ispitivanja za sve tri faze prikazani su u prilogu 1.

Pošto je Laboratorij za ispitivanje mehaničkih svojstava akreditiran i međunarodno priznat za umjeravanje mjerila sile ujedno će se napraviti i provjera stabilnosti pokazivanja referentnog etalona KBNM-500 kN. Uređaj na kojem se provode ispitivanja detaljnije je opisan u poglavlju 5.

Nakon utvrđene mjerne sposobnosti, odnosno preciznosti uređaja, napraviti će se usporedba rezultata s mjerenjima koja su provedena u nacionalnom institutu UME.

Mjerenja su provedena:

- u Turskoj, institut UME (Ulusal Metroloji Enstitusu), početkom 2017. godine [21],
- na FSB-u u LIMS-u, krajem 2017. (prilog 1).

Na temelju usporedbe dobiti će se uvid u točnost rezultata u ovom radu. Ukoliko bude većih odstupanja pokazivanja KBNM 500 kN provest će se ponovna linearizacija referentnog etalona sile te ponovna provjera.

6.1.1. Provedba postupka umjeravanja

Uređaj s referentnim etalonom sile KBNM-500 kN korišten je za provedbu umjeravanja posrednički etalona sile (dinamometra) tipa Z4. Umjeravanje se radi sukladno normi HRN EN ISO 376. Pošto se radi o vrlo preciznom uređaju potrebno je poznavati sve utjecajne faktore pa je iz tog razloga prvi korak čitanje literature, norme HRN EN ISO 376 i radnih uputa laboratorija [19].

Predradnje koje propisuje norma i koje su provedene prije početka umjeravanja [17, 20]:

- klimatiziran prostor, 18-28 °C (održavanje temperature tokom mjerenja $\pm 0,5$ °C),
- provjera ima li dodatnih vibracija iz okolnog područja,
- provjera svih dijelova posredničkih etalona (kablova za električno povezivanje),
- bilježenje nul signala (rasterećen dinamometar),
- obavezna upotreba rukavica pri radu,
- temperiranje dinamometra prije početka mjerenja minimalno 120 minuta.

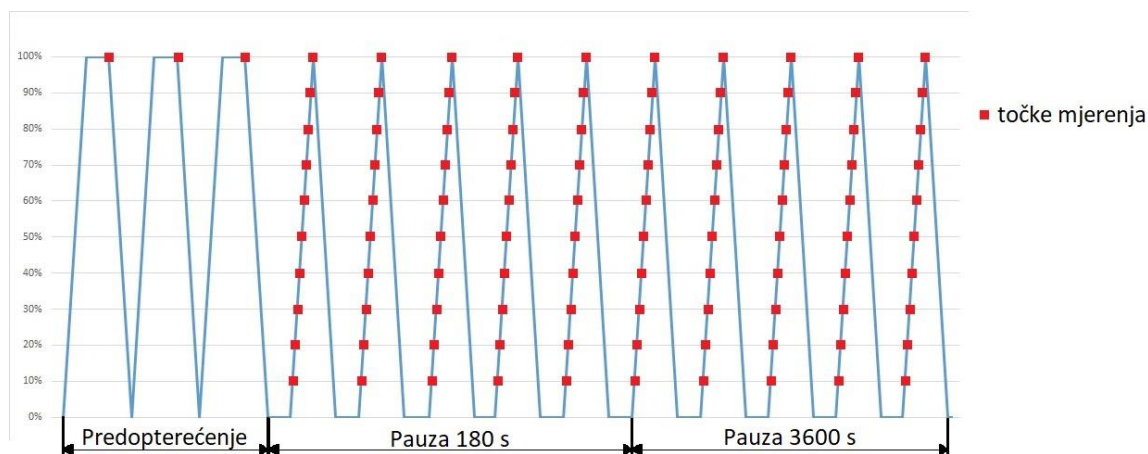
Opreznim rukovanjem smanjuje se mogućnost unošenja pogreške na mjerenu vrijednost. Upotrebom rukavica izbjegava se unošenje topline na mjesta koja se dodiruju. Uz temperaturu koja se bilježi pomoću posebnog senzora svakih 20 minuta prati se i relativna vlažnost zraka u prostoriji gdje se odvija mjerenje. Osim eliminacije svih poznatih utjecaja, bitan faktor koji se navodi u uputama je iskustvo mjeritelja, te pošten i korektan odnos svih sudionika mjerenja [20].

6.1.2. Podjela ispitivanja u 3 faze

Obzirom na tijek opterećenja dinamometra ispitivanje je podijeljeno u 3 faze:

- 1 faza:
 - Predopterećenje do nazivne vrijednosti dinamometra, zadržavanje 40 sekundi i rasterećenje, ponovljeno 3 puta,
 - Uzlazni niz opterećenja, početna vrijednost na 10%, u 10 točaka do 100% nazivne vrijednosti,
 - Pauza između 1-5 niza 180 sekundi,
 - Pauza između 5-10 niza 3600 sekundi.

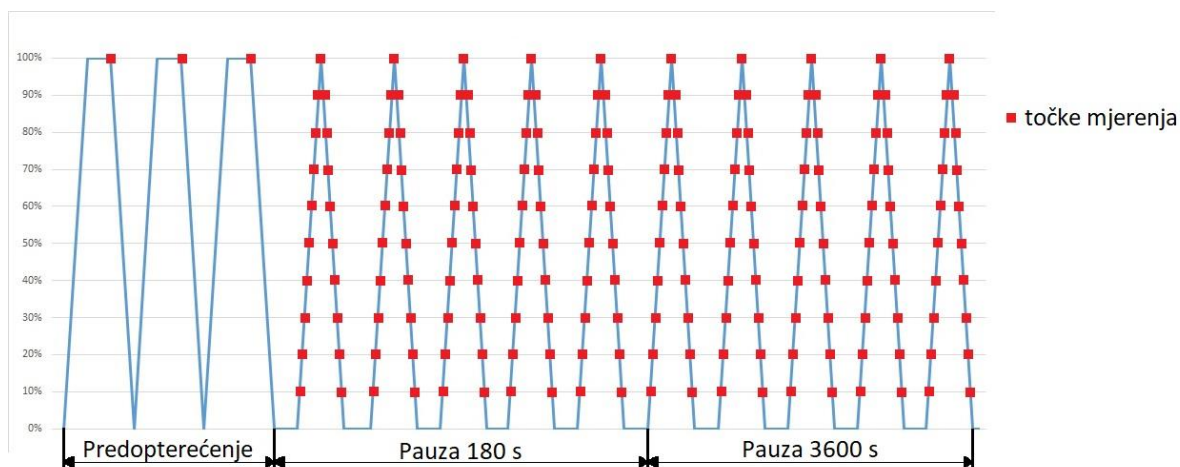
Na slici 19 shematski je prikazan postupak 1. faze.



Slika 19 Shematski prikaz opterećenja u 1. fazi eksperimentalnog rada

- 2 faza:
 - Predopterećenje do nazivne vrijednosti dinamometra, zadržavanje 40 sekundi i rasterećenje, ponovljeno 3 puta,
 - Uzlazno – silazni niz opterećenja, početna vrijednost na 10%, u 10 točaka uzlazno do 100% nazivne vrijednosti i u 10 točaka silazno do 10%,
 - Pauza između 1-5 niza 180 sekundi,
 - Pauza između 5-10 niza 3600 sekundi.

Na slici 20 shematski je prikazan postupak 2. faze.

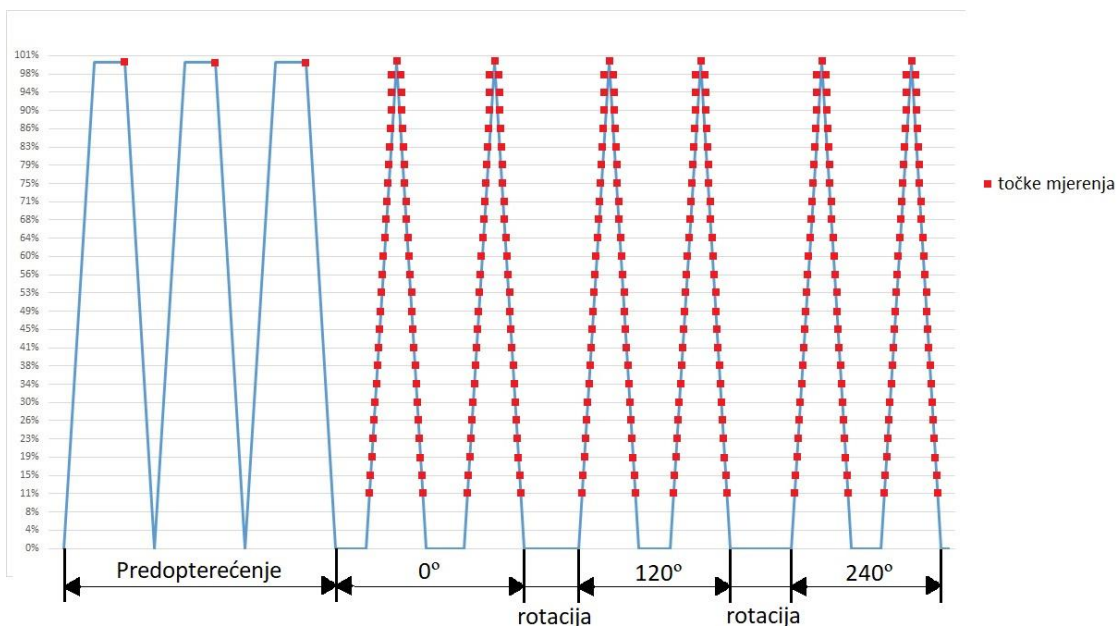


Slika 20 Shematski prikaz opterećenja u 2. fazi eksperimentalnog rada

- 3 faza:

- Predopterećenje do nazivne vrijednosti dinamometra, zadržavanje 40 sekundi i rasterećenje, ponovljeno 3 puta,
- Uzlazno – silazni niz opterećenja, početna vrijednost na 10%, u 25 točaka uzlazno do 100% nazivne vrijednosti i u 25 točaka silazno do 10%,
- Pauza između svih nizova su 180 sekundi,
- Ponovljen postupak za 2 niza nakon čega slijedi rotacija dinamometra za 120°,
- Ispitivanje provedeno na 0°, 120° i 240°.

Na slici 21 shematski je prikazan postupak 3. faze.



Slika 21 Shematski prikaz opterećenja u 3. fazi eksperimentalnog rada

U sve 3 faze prema normi se provelo:

- centriranje dinamometra (prije početka mjerenja i nakon zakretanja),
- mjerenje nul signala (ukazuje na moguću plastičnu deformaciju),
- zadržavanje od 30 sekundi na mjernim točkama zbog stabilizacije i preciznijeg očitavanja vrijednosti,
- korišten je filter na mjernom pojačalu od 0,1 HzBe koji služi kao filter šumova.

U svakoj od faza postupak je proveden na posredničkim etalonima (dinamometrima):

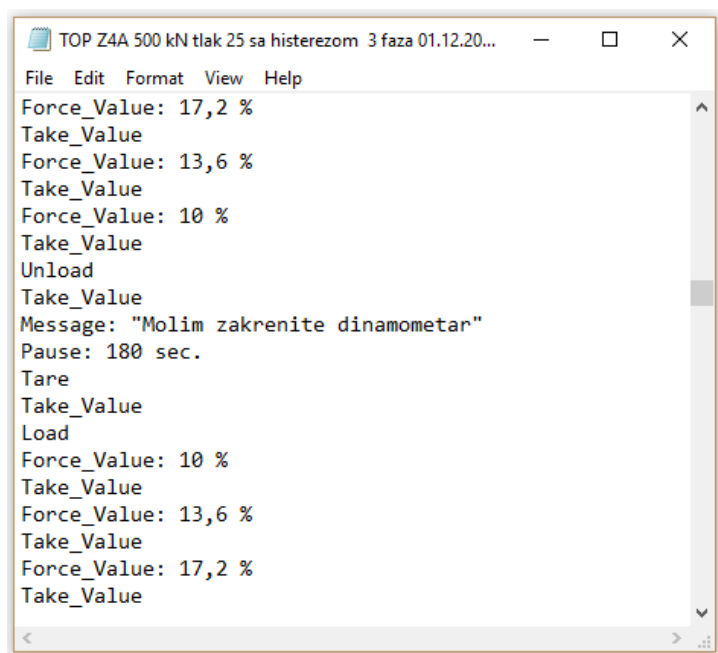
- 50 kN, tip Z4 – TOP,
- 100 kN, tip Z4 – TOP,
- 500 kN, tip Z4 – TOP.

Prva i druga faza rađene su bez rotacije, ali s pauzama od 3600 sekundi između zadnjih 5 nizova. Zbog toga je jedan ciklus mjerenja trajao oko 8 sati.

Treća faza imala je normom propisane pauze od 180 sekundi, no bilo je potrebno zakretati posrednički etalon (dinamometar) nakon svaka dva niza. Prije nego se uređaj pokrene zadaju mu se sve željene radnje. Programiranjem se zadala napomena o zaustavljanju procesa mjerenja dok se posrednički etalon ne centrira u novi položaj. Pošto se u ovoj fazi radilo mjerenje u 25 uzlaznih i 25 silaznih točaka mjerenje je trajalo oko 4 sata.

6.1.3. Programiranje ciklusa umjeravanja

Programiranje ciklusa umjeravanja provodi se u programu Notepad. Prije početka mjerenja potrebno je zadati sve željene radnje jednostavnim naredbama kako je prikazano na slici 22.



Slika 22 Upisivanje naredba u Notepadu

Značenje određene naredbe prikazano je u tablici 3:

Tablica 3 Naredbe sa značenjima za programiranje uređaja

| NAREDBA | ZNAČENJE |
|---------------------------|--|
| LIMS TOP Z4A xx kN | Označavanje nazivne vrijednosti (xx) etalona |
| Load | Opteretiti |
| Unload | Rasteretiti |
| Force_Value: x% | Vrijednost sile na x% od nazivne vrijednosti |
| Take_Value | Bilježenje vrijednosti |
| Message | Upozorenje, potrebno potvrditi čitanje |
| Pause: x sec. | Pauza od x sekundi |
| Tare | Namještanje nule prije novog niza |

Na temelju naredba uređaj provodi mjerenja. Potrebno je nadzirati rad, ali nisu potrebne nikakve druge radnje vođenja procesa mjerenja. Naredbe koje su krivo upisane uređaj ne prepoznaje i proces se zaustavlja. U tom slučaju potrebno je ispraviti grešku u programiranju ciklusa i pokrenuti umjeravanje. U slučaju preopterećenja uzrokovanog krivom naredbom uređaj ima sigurnosnu skalu prikazanu na slici 23 na temelju koje se ograniči opterećenje na maksimalno moguće opterećenje dinamometra koji se mjeri pa prelaskom te granice uređaj automatski prekida opterećivanje.



Slika 23 Mjerna skala za ograničenje opterećenja

6.2. Model procjene proračuna pogrešaka i mjernih nesigurnosti

Analiza mjernih rezultata i izračun pojedinih relativnih pogrešaka i proširene mjerne nesigurnosti radi se na temelju očitavanja na mjernom pojačalu koja predstavljaju elastičnu deformaciju dinamometra. Deformacija se može definirati kao razlika između očitavanja u trenutku djelovanja sile i očitavanja u trenutku kad dinamometar nije opterećen. Navedena definicija deformacije vrijedi za izlazne vrijednosti očitavanja u električnim jedinicama (mV/V), a kod proračuna one se izražavaju u postocima [20].

U tablici 4 su prikazane vrijednosti koje mjereni etalon svrstavaju u jednu od 4 klase. Da bi etalon pripao određenoj mornoj klasi potrebno je da baš svi od uvjeta budu i istoj toj klasi. Odnosno, klasa se dodjeljuje prema najslabijoj vrijednosti iz kriterija dodjeljivanja klase. Mjerno područje za koje se klasificira posrednički etalon sile određuje se tako da svaka točka, jedna za drugom, počevši od maksimalne tj. nazivne sile, zadovoljava zahtijevane kriterije. Klasificirano morno područje završava na zadnjoj točki u kojoj su zadovoljeni kriteriji klasifikacije. Za dodjeljivanje klase treba se pokriti barem područje 50-100% od nazivne vrijednosti [20].

Tablica 4 Maksimalna dopuštena vrijednost pojedinih parametara u skladu s klasom posredničkog etalona sile [20]

| Klasa | Relativne pogreške posredničkog etalona sile, % | | | | | | Proširena nesigurnost primjenjene sile umjeravanja, % $k = 2$ |
|-------|---|---------------|---------------|-------------|-----------|---------|--|
| | obnovljivosti | ponovljivosti | interpolacije | nule | histereze | puzanja | |
| | b | b' | f_c | f_o | ν | c | |
| 00 | 0,05 | 0,025 | $\pm 0,025$ | $\pm 0,012$ | 0,07 | 0,025 | $\pm 0,01$ |
| 0,5 | 0,10 | 0,05 | $\pm 0,05$ | $\pm 0,025$ | 0,15 | 0,05 | $\pm 0,02$ |
| 1 | 0,20 | 0,10 | $\pm 0,10$ | $\pm 0,05$ | 0,30 | 0,10 | $\pm 0,05$ |
| 2 | 0,40 | 0,20 | $\pm 0,20$ | $\pm 0,10$ | 0,50 | 0,20 | $\pm 0,10$ |

6.2.1. Proračun relativnih pogrešaka umjeravanja posredničkih etalona

Primjenom formula iz radnih uputa Laboratorija za ispitivanje mehaničkih svojstava radi se proračun svih relativnih pogrešaka prijenosnog etalona, a to su:

- Relativna pogreška obnovljivosti,
- Relativna pogreška ponovljivost,
- Relativna pogreška interpolacije,
- Relativna pogreška nule,
- Relativna pogreška histereze.

- **Relativne pogreške obnovljivosti (b) i ponovljivosti (b')**

Ove pogreške računaju se za svaku silu umjeravanja, tj. s rotacijom dinamometra (b) i bez rotacije dinamometra (b'). Obzirom da u ovom radu nisu rađene rotacije u svim fazama mjerenja, proračun obnovljivosti raditi će se samo tamo gdje je to moguće. Također, broj točaka mjerenja se razlikuje pa će se izrazi mijenjati obzirom na fazu mjerenja. Općeniti izrazi za računanje relativne pogreške obnovljivosti i ponovljivosti dani su izrazima [20]:

$$b = \left| \frac{X_{\max} - X_{\min}}{\overline{X_r}} \right| \times 100 \quad (5.1.)$$

pri čemu je:

$$\overline{X_r} = \frac{X_1 + X_3 + X_5}{3}$$

Za ponovljivost korišteni su sljedeći izrazi:

$$b' = \left| \frac{X_2 - X_1}{\overline{X_{wr}}} \right| \times 100 \quad (5.2.)$$

gdje je općenito:

$$\overline{X_{wr}} = \frac{X_1 + X_2}{2}$$

Odnosno zbroj svih uzlaznih nizova prije rotacije. U prvoj fazi su to sva mjerenja, dok u drugoj i trećoj fazi postoje silazni nizovi označeni s X' pa se njih ne uključuje u proračun pogreške obnovljivosti i ponovljivosti.

- **Relativna pogreška interpolacije, f_c**

Ova pogreška određuje se pomoću jednadžbe polinoma prvog, drugog ili trećeg reda kojom se očitavanje može izraziti kao funkcija sile umjeravanja. U ovom radu korišten je polinom trećeg reda čime se umanjuje utjecaj pogreške zbog interpolacije. Koeficijenti jednadžbe su manji od 0 (npr. 1×10^{-8}) gdje je je bitna i decimalna mjesta koja je potrebno prilagoditi dobivenoj vrijednosti mjerne nesigurnosti. Relativna pogreška interpolacije računa se iz sljedećeg izraza [20]:

$$f_c = \frac{\overline{X_r} - X_a}{X_a} \times 100 \quad (5.3.)$$

- **Relativna pogreška nule, f_0**

Očitavanje u rasterećenom stanju treba zabilježiti nakon svakog niza mjerenja. Očitavanje u rasterećenom stanju uzima se najmanje 30 sekundi nakon potpunog prestanka djelovanja sile. U obzir je dalje potrebno uzimati samo najveću procijenjenu pogrešku pokazivanja nule. U prvoj i drugoj fazi mjerenja u ovom radu bira se najveća pogreška među 10 pogrešaka nule, dok u trećoj fazi postoji 6 pogrešaka nule od kojih se bira samo najveća vrijednost. Relativna pogreška pokazivanja nule računa se iz izraza [20]:

$$f_0 = \frac{i_f - i_0}{X_N} \times 100 \quad (5.4.)$$

- **Relativna pogreška histereze, v**

Relativna pogreška histereze određuje se za svaku silu umjeravanja, tako da se provodi opterećenje rastućim i padajućim silama. Razlika između očitavanja ta dva niza koristi se za izračun relativne pogreške histereze preko sljedećih izraza [20]:

$$v_1 = \left| \frac{X'_4 - X_3}{X_3} \right| \times 100 \quad \text{i} \quad v_2 = \left| \frac{X'_6 - X_5}{X_5} \right| \times 100 \quad (5.5.)$$

i konačno:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{2}$$

X'_n – označava vrijednosti silaznog niza

X_n – označava vrijednosti uzlaznog niza

v – ukupna relativna pogreška histereze

Relativna pogreška histereze (v) općenito se izračunava kao srednja vrijednost svih pojedinačnih pogrešaka nastalih pri uzlazno silaznim nizovima. U ovom radu relativna pogreška zbog histereze računala se za drugu i treću fazu gdje postoje ulazno silazni nizovi. Za prvu fazu se ne računa relativna pogreška histereze jer su rađeni samo uzlazni nizovi.

6.2.2. Proračun mjerne nesigurnosti umjeravanja posredničkih etalona

Za svaku silu umjeravanja potrebno je izračunati mjernu nesigurnost. Nesigurnost se računa pomoću očitavanja dobivenih tijekom umjeravanja i normom propisanih konstantnih parametara.

Mjerna nesigurnost uključuje utjecaje [20]:

- primijenjene sile umjeravanja,
- ponovljivosti i obnovljivosti rezultata,
- rezolucije uređaja za očitavanje,
- temperature umjeravanja,
- interpolacije,
- histereze i
- najbolje mjerne sposobnosti.

Na temelju rezultata mjerne nesigurnosti dobiva se konačno proširena mjerna nesigurnost (W) koja propisano normi određuje klasu za svaku pojedinu primijenjenu silu. Mjerno područje koje ulazi u klasu određuje se počevši od nazivne (maksimalne) vrijednosti dinamometra i završava tamo gdje zadnja vrijednost sile još uvijek zadovoljava kriterije promatrane klase. Da bi klasa bila prihvaćena mora se pokriti barem 50% mjerenog područja [20].

- **Relativna standardna mjerna nesigurnost primijenjene sile, w_1**

Relativna standardna nesigurnost primijenjene sile, w_1 , općenito je jednaka najboljoj mjernoj sposobnosti mašine na kojoj se provodi umjeravanje podijeljena s vrijednošću faktora pokrivanja, k . Računa se prema sljedećem izrazu [20]:

$$w_1 = \frac{w_{bmc}}{k} \quad (5.6.)$$

Za konstantu k uzima se vrijednost $k=2$. Kada se uvrsti najbolja mjerna sposobnost mašine ($w_{bmc}= 0,0005$) za mašinu koja se nalazi u Laboratoriju za ispitivanje mehaničkih svojstva vrijednost mjerne nesigurnosti primijenjene sile je konstantna i iznosi:

$$w_1 = 0,00025$$

- **Relativna standardna mjerna nesigurnost obnovljivosti, w_2**

Komponenta nesigurnosti uslijed obnovljivosti može se definirati kao standardna devijacija srednje vrijednosti očitavanja pri uzlaznim mjernim nizovima. Općenito se može izraziti kao [20]:

$$w_2 = \frac{1}{|\overline{X_r}|} \times \sqrt{\frac{1}{6} \times \sum_{i=1,3,5} (X_i - \overline{X_r})^2} \quad (5.7.)$$

Mjerna nesigurnost obnovljivosti računat će se za mjerenja gdje se radila rotacijom dinamometra, odnosno samo u trećoj fazi.

- **Relativna standardna mjerna nesigurnost ponovljivosti, w_3**

Komponenta relativne mjerne nesigurnosti određuje se dijeljenjem relativne pogreške ponovljivosti s konstantom prema sljedećem matematičkom izrazu [20]:

$$w_3 = \frac{b'}{100 \times \sqrt{3}} \quad (5.8.)$$

- **Relativna standardna mjerna nesigurnost rezolucije, w_4**

Vrijednost rezolucije uzima se u obzir dva puta primjenom dvije pravokutne razdiobe, svaka sa standardnom nesigurnošću $r/(2\sqrt{3})$ gdje je r rezolucija mjernog pojačala. Navedeno je jednako jednoj trokutnoj razdiobi sa standardnom nesigurnošću $r/\sqrt{6}$ i izražava se za svaku primijenjenu silu prema sljedećoj jednadžbi [20]:

$$w_4 = \frac{1}{\sqrt{6}} \times \frac{r}{F} \quad (5.9.)$$

gdje je:

$$r = 0,000001 \text{ [mV/V]}$$

Pojednostavljeno, sve osim F je konsantnog iznosa, a promjena sile prati se promjenom električnog signala na mjernom pojačalu čija se vrijednost uvrštava u formulu.

- **Relativna standardna mjerna nesigurnost histereze, w_5**

Komponenta nesigurnosti uslijed histereze odnosi se na činjenicu da na izmjerenu vrijednost mogu utjecati prethodno provedena mjerenja, odnosno primijenjena opterećenja. Mjera navedenog utjecaja je promjena izlaznog signala prijenosnog etalona sile uzrokovane histerezom nakon opterećenja ili rasterećenja s maksimalne, tj. nazivne sile. Navedeni utjecaj računa se prema sljedećem izrazu [20]:

$$w_5 = \frac{v}{100 \times 3\sqrt{3}} \quad (5.10.)$$

Histereza se javlja kod uzlazno silaznih opterećenja, prema tome računat će se samo u drugoj i trećoj fazi mjerenja.

- **Relativna standardna mjerna nesigurnost nul-očitavanja, w_6**

Komponenta nesigurnosti uslijed mogućnosti varijacije očitavanja nule između različitih mjernih nizova te očitana vrijednost može biti funkcija vremena provedenog na nuli. Navedeni utjecaj nije uvršten u proračun obnovljivosti iz razloga što bi pauza tj. vremenski interval trebao biti isti za sve mjerne nizove. Veličina koja definira navedeno je relativna pogreška nule sukladno HRN EN ISO 376 pa se shodno tome nesigurnost nule može odrediti prema sljedećem izrazu [20]:

$$w_6 = \frac{f_0}{100} \quad (5.11.)$$

- **Relativna standardna mjerna nesigurnost utjecaja temperature, w_7**

Komponenta nesigurnosti koje se odnose na temperaturne promjene tijekom samog postupka umjeravanja posredničkih etalona sile. Temperaturna osjetljivost instrumenta (K) mora biti određena ispitivanjem ili od strane proizvođača. Najčešće je ona određena od strane proizvođača te se određuje kao relativna vrijednost prema sljedećem izrazu [20]:

$$w_7 = K \times \frac{\Delta T}{2} \times \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (5.12.)$$

pri čemu je:

K – temperaturni koeficijent instrumenta, $^{\circ}\text{C}^{-1}$

ΔT – temperaturni raspon tijekom umjeravanja, $^{\circ}\text{C}$

Važno je za napomenuti da će utjecaj ove komponentne općenito biti zanemariv (ΔT vrlo vjerojatvo neće biti veći od $0,5^{\circ}\text{C}$, a vrijednost $K=0,00005^{\circ}\text{C}^{-1}$ dajući pri tome vrijednost mjerne nesigurnosti $w_7 = 0.0007\%$ što je zanemarivo.

- **Relativna standardna mjerna nesigurnost interpolacije, w_8**

U slučajevima kada se koristi interpolacijska krivulja nesigurnost interpolacije mora se uzeti u obzir obzirom da vrijednosti očitavanja pri određenim silama dobivene interpolacijskom krivuljom nisu idealne vrijednosti što uzrokuje određenu nesigurnost. Metodom devijacije određuje se komponenta nesigurnosti koja predstavlja razliku između srednjih vrijednosti očitavanja izmjerenih kod mjernih nizova s rotacijom, X_r , i vrijednosti izračunatih jednadžbom interpolacije, X_a , izražene kao relativna vrijednost preko sljedećeg izraza [20]:

$$w_8 = \left| \frac{\overline{X_r} - X_a}{\overline{X_r}} \right| \quad (5.13.)$$

- **Sastavljena relativna standardna mjerna nesigurnost, w_c**

Sastavljena relativna standardna mjerna nesigurnost računa se iz pojedinih sastavnica standardnih nesigurnosti kao korijen iz sume kvadrata pojedinih mjernih nesigurnosti prema izrazu [20]:

$$w_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 w_i^2} \quad (5.14.)$$

w_c – računa se za svaku primijenjenu silu posebno.

- **Proširena relativna standardna mjerna nesigurnost umjeravanja, W**

I konačno, proširena relativna standardna mjerna nesigurnost izražava se jednadžbom uz sastavljenu mjernu nesigurnost w_c i k kao faktor pokrivanja sljedećim izrazom [20]:

$$W = k \times w_c \quad (5.15.)$$

gdje je: $k = 2$

W se također izražava za sve primjenjene sile. Prema tablici 5 radi se klasificiranje za točno definirano područje primjenjene sile koje mora biti barem u gornjoj polovici mjerenja, u suprotnom, ako nisu zadovoljeni uvjeti promatrane klase uzima se klasa niže vrijednosti.

6.3. Obrada rezultata i analiza

Prema formulama iz poglavlja 6.2. u ovom radu napravljeni su proračuni svih utjecajnih veličina kako bi se konačno mogla odrediti proširena mjerna nesigurnosti (W). Proračuni su rađeni posebno za svaku fazu u programu Excel. Izrađen je model za proračun obzirom na broj podataka i vrstu prijenosnog etalona (50 kN, 100 kN i 500kN) pa je ukupno napravljeno 9 Excel modela za proračun.

Proračun je rađen sljedećim redom:

- upisivanje izmjerenih podataka u tablicu za nizove uz pripadajuće sile opterećenja (izmjerene podaci nalaze se u prilogu 1),
- svakoj izmjerenoj vrijednosti u jednom nizu oduzeta je vrijednost nul signala s početka tog niza (zbog pogreške nastale uslijed mjerenja)
- izračun srednje vrijednosti podataka X_{wr} i X_r ,
- određena je jednadžba interpolacijske krivulje, polinom trećeg stupnja, na temelju srednje vrijednosti izmjerenih podataka (X_r) i pripadajućoj sili,
- iz jednadžbe interpolacijske krivulje dobivena je računaska vrijednost za pripadajuće sile, X_a ,
- napravljen je izračun relativne pogreške: ponovljivosti, obnovljivosti, interpolacije, histereze i pogreške nule,
- izračunate su mjerne nesigurnosti: primijenjene sile, ponovljivosti, obnovljivosti, rezolucije, histereze, temperature, nule, interpolacije,
- iz mjernih nesigurnosti izračunata je sastavljena relativna standardna mjerna nesigurnost, w_c ,
- i konačno, proširena relativna standardna mjerna nesigurnost (W) za svaku primijenjenu silu.

6.3.1. Vrijednosti X_{wr} i X_r i usporedba s mjerenjima iz UME

Početak izračuna je dobivanje srednjih vrijednosti očitavanja X_{wr} (X - without rotation) za mjerenja bez rotacije i X_r (X – rotation) za mjerenja s rotacijom. Te srednje vrijednosti računale su se iz prethodno napravljene tablice u Excelu za unos izmjerenih podataka prema mjernim nizovima uz pripadajuće sile.

Za očekivati je da će vrijednosti u svim fazama biti približno iste i u dozvoljenim odstupanjima. Mjerenje je provedeno na istim posredničkim etalonima od 50 kN, 100 kN i 500 kN u tri faze, ali istim kontroliranim uvjetima i korištena je ista oprema. Rezultati će se usporediti na način da se vrijednost dobivene iz Turske (tvrtka UME) za pojedinu silu uzmu kao referentna vrijednost te na temelju nje odrede postotna odstupanja ostalih faza za iste te sile. Postotna odstupanja dobivena su sljedećim izrazom [20]:

$$\Delta X = \frac{X_{ume} - X_i}{X_{ume}} \times 100 \quad (5.16.)$$

• 50 kN

Rezultati po fazama za 50 kN slijede u tablicama 5 i 6:

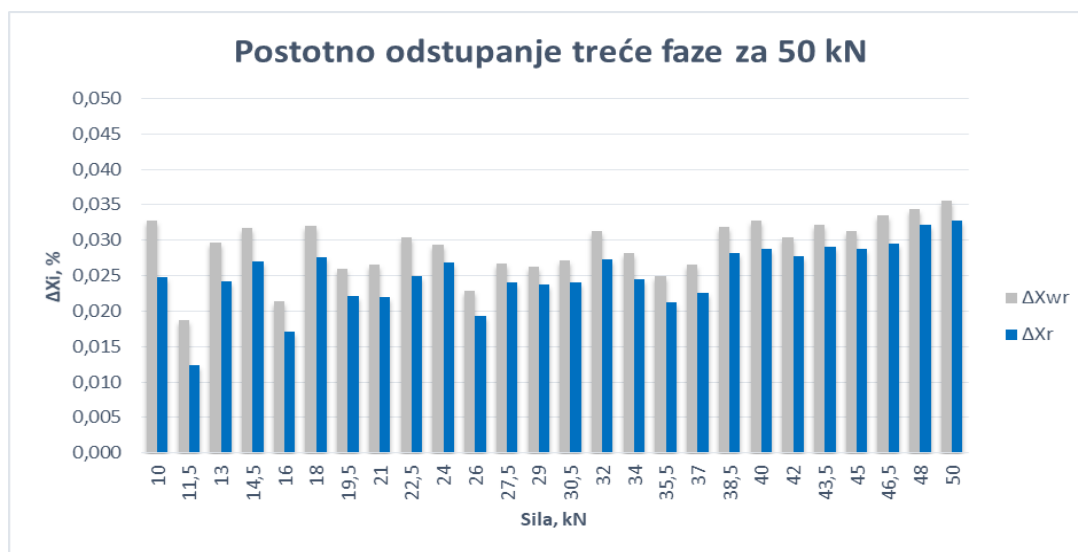
Tablica 5 Vrijednosti X_{wr} prve i druge faze za 50 kN

| | UME | 1. faza | 2. faza | $\Delta X_{1. faza}$ | $\Delta X_{2. faza}$ |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| F, kN | X_{wr} [mV/V] | X_{wr} [mV/V] | X_{wr} [mV/V] | ΔX_{wr} [%] | ΔX_{wr} [%] |
| 10 | 0,399844 | 0,399798 | 0,3997521 | 0,012 | 0,023 |
| 15 | 0,599786 | 0,599685 | 0,5996798 | 0,017 | 0,018 |
| 20 | 0,799744 | 0,799606 | 0,7995971 | 0,017 | 0,018 |
| 25 | 0,999704 | 0,999473 | 0,9994818 | 0,023 | 0,022 |
| 30 | 1,199690 | 1,199462 | 1,1994026 | 0,019 | 0,024 |
| 35 | 1,399692 | 1,399349 | 1,3993934 | 0,025 | 0,021 |
| 40 | 1,599709 | 1,599256 | 1,5992636 | 0,028 | 0,028 |
| 45 | 1,799748 | 1,799285 | 1,7992309 | 0,026 | 0,029 |
| 50 | 1,999807 | 1,999255 | 1,9992449 | 0,028 | 0,028 |

Tablica 6 Vrijednosti X_{wr} i X_r treće faze za 50 kN

| | UME | 3. faza | | $\Delta X_{3. \text{ faza}}$ | |
|-------|--------------|-----------------|--------------|------------------------------|------------------|
| F, kN | X_a [mV/V] | X_{wr} [mV/V] | X_r [mV/V] | ΔX_{wr} [%] | ΔX_r [%] |
| 10,0 | 0,399848 | 0,399717 | 0,399749 | 0,033 | 0,025 |
| 11,5 | 0,459831 | 0,459745 | 0,459774 | 0,019 | 0,012 |
| 13,0 | 0,519814 | 0,519660 | 0,519688 | 0,030 | 0,024 |
| 14,5 | 0,579799 | 0,579615 | 0,579642 | 0,032 | 0,027 |
| 16,0 | 0,639785 | 0,639648 | 0,639676 | 0,021 | 0,017 |
| 18,0 | 0,719769 | 0,719538 | 0,719570 | 0,032 | 0,028 |
| 19,5 | 0,779758 | 0,779555 | 0,779586 | 0,026 | 0,022 |
| 21,0 | 0,839749 | 0,839526 | 0,839565 | 0,027 | 0,022 |
| 22,5 | 0,899741 | 0,899468 | 0,899516 | 0,030 | 0,025 |
| 24,0 | 0,959734 | 0,959452 | 0,959476 | 0,029 | 0,027 |
| 26,0 | 1,039728 | 1,039490 | 1,039527 | 0,023 | 0,019 |
| 27,5 | 1,099724 | 1,099431 | 1,099459 | 0,027 | 0,024 |
| 29,0 | 1,159722 | 1,159418 | 1,159447 | 0,026 | 0,024 |
| 30,5 | 1,219722 | 1,219390 | 1,219429 | 0,027 | 0,024 |
| 32,0 | 1,279723 | 1,279323 | 1,279374 | 0,031 | 0,027 |
| 34,0 | 1,359727 | 1,359343 | 1,359393 | 0,028 | 0,025 |
| 35,5 | 1,419731 | 1,419378 | 1,419429 | 0,025 | 0,021 |
| 37,0 | 1,479737 | 1,479343 | 1,479403 | 0,027 | 0,023 |
| 38,5 | 1,539745 | 1,539254 | 1,539310 | 0,032 | 0,028 |
| 40,0 | 1,599753 | 1,599229 | 1,599292 | 0,033 | 0,029 |
| 42,0 | 1,679768 | 1,679258 | 1,679301 | 0,030 | 0,028 |
| 43,5 | 1,739780 | 1,739219 | 1,739275 | 0,032 | 0,029 |
| 45,0 | 1,799794 | 1,799231 | 1,799277 | 0,031 | 0,029 |
| 46,5 | 1,859805 | 1,859183 | 1,859257 | 0,033 | 0,029 |
| 48,0 | 1,919827 | 1,919166 | 1,919209 | 0,034 | 0,032 |
| 50,0 | 1,999852 | 1,999140 | 1,999196 | 0,036 | 0,033 |

Vidljivo je da odstupanje postoji u sve 3 faze i kreće se u rasponu 0,012-0,036. Te vrijednosti dobivene su izrazom (5.16.). Na slici 24 grafički je prikazano postotno odstupanje rezultata treće faze u odnosu na UME.



Slika 24 Postotno odstupanje treće faze u odnosu na UME za 50 kN

Usporedbom rezultata odstupanja pokazivanja posredničkog etalona sile 50 kN za sve tri faze u odnosu na rezultate umjeravanja u UME-u vidljivo je da su u trećoj fazi ta odstupanja veća u odnosu na prvu i drugu fazu mjerenja u LIMS-u. Odstupanja vrijednosti u prvoj i drugoj fazi su nešto niža u prvoj polovici mjernog područja dok u trećoj fazi su te vrijednosti podjednake u cijelom mjernom području.

• 100 kN

Rezultati po fazama za 100 kN prikazani su u tablicama 7 i 8:

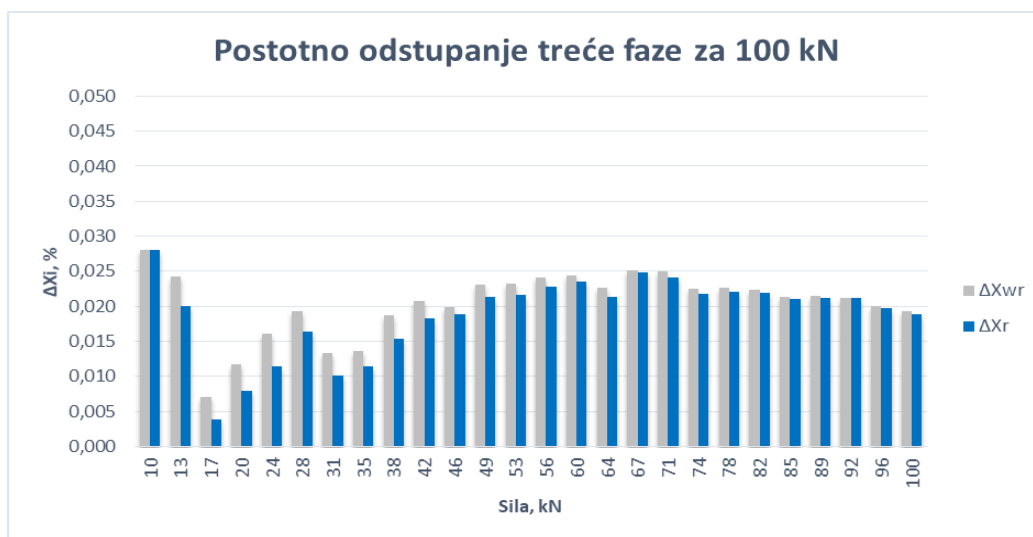
Tablica 7 Vrijednosti X_{wr} prve i druge faze za 100 kN

| | UME | 1. faza | 2. faza | $\Delta X_{1. faza}$ | $\Delta X_{2. faza}$ |
|-------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| F, kN | X_{wr} [mV/V] | X_{wr} [mV/V] | X_{wr} [mV/V] | ΔX_{wr} [%] | ΔX_{wr} [%] |
| 10 | 0,199946 | 0,199874 | 0,199892 | 0,036 | 0,027 |
| 20 | 0,399887 | 0,399826 | 0,399852 | 0,015 | 0,009 |
| 30 | 0,599828 | 0,599713 | 0,599759 | 0,019 | 0,012 |
| 40 | 0,799771 | 0,799551 | 0,799615 | 0,028 | 0,020 |
| 50 | 0,999725 | 0,999447 | 0,999528 | 0,028 | 0,020 |
| 60 | 1,199708 | 1,199310 | 1,199417 | 0,033 | 0,024 |
| 70 | 1,399664 | 1,399193 | 1,399312 | 0,034 | 0,025 |
| 80 | 1,599635 | 1,599091 | 1,599239 | 0,034 | 0,025 |
| 90 | 1,799612 | 1,799043 | 1,799205 | 0,032 | 0,023 |
| 100 | 1,999537 | 1,998962 | 0,199892 | 0,029 | -0,018 |

Tablica 8 Vrijednosti X_{wr} i X_r treće faze za 100 kN

| | UME | 3. faza | | $\Delta X_{3. \text{ faza}}$ | |
|-------|--------------|-----------------|--------------|------------------------------|------------------|
| F, kN | X_a [mV/V] | X_{wr} [mV/V] | X_r [mV/V] | ΔX_{wr} [%] | ΔX_r [%] |
| 10 | 0,199939 | 0,199883 | 0,199883 | 0,028 | 0,028 |
| 13 | 0,259923 | 0,259860 | 0,259871 | 0,024 | 0,020 |
| 17 | 0,339902 | 0,339878 | 0,339889 | 0,007 | 0,004 |
| 20 | 0,399887 | 0,399840 | 0,399855 | 0,012 | 0,008 |
| 24 | 0,479868 | 0,479791 | 0,479813 | 0,016 | 0,011 |
| 28 | 0,55985 | 0,559742 | 0,559758 | 0,019 | 0,016 |
| 31 | 0,619838 | 0,619755 | 0,619775 | 0,013 | 0,010 |
| 35 | 0,699822 | 0,699727 | 0,699742 | 0,014 | 0,011 |
| 38 | 0,759810 | 0,759668 | 0,759693 | 0,019 | 0,015 |
| 42 | 0,839795 | 0,839621 | 0,839641 | 0,021 | 0,018 |
| 46 | 0,919781 | 0,919598 | 0,919608 | 0,020 | 0,019 |
| 49 | 0,979771 | 0,979545 | 0,979562 | 0,023 | 0,021 |
| 53 | 1,059758 | 1,059512 | 1,059528 | 0,023 | 0,022 |
| 56 | 1,119748 | 1,119478 | 1,119493 | 0,024 | 0,023 |
| 60 | 1,199736 | 1,199443 | 1,199453 | 0,024 | 0,024 |
| 64 | 1,279723 | 1,279434 | 1,279449 | 0,023 | 0,021 |
| 67 | 1,339714 | 1,339378 | 1,339381 | 0,025 | 0,025 |
| 71 | 1,419702 | 1,419348 | 1,419360 | 0,025 | 0,024 |
| 74 | 1,479692 | 1,479360 | 1,479369 | 0,022 | 0,022 |
| 78 | 1,559680 | 1,559326 | 1,559335 | 0,023 | 0,022 |
| 82 | 1,639667 | 1,639301 | 1,639307 | 0,022 | 0,022 |
| 85 | 1,699657 | 1,699295 | 1,699300 | 0,021 | 0,021 |
| 89 | 1,779644 | 1,779262 | 1,779267 | 0,021 | 0,021 |
| 92 | 1,839634 | 1,839244 | 1,839243 | 0,021 | 0,021 |
| 96 | 1,919619 | 1,919235 | 1,919241 | 0,020 | 0,020 |
| 100 | 1,999604 | 1,999219 | 1,999228 | 0,019 | 0,019 |

Vidljivo je da odstupanje postoji u sve 3 faze i kreće se u rasponu 0,004-0,028. Te vrijednosti dobivene su izrazom (5.16.). Na slici 25 grafički je prikazano postotno odstupanje rezultata treće faze u odnosu na UME.



Slika 25 Postotno odstupanje treće faze u odnosu na UME za 100 kN

Usporedbom rezultata odstupanja pokazivanja posredničkog etalona sile 100 kN za sve tri faze u odnosu na rezultate umjeravanja u UME-u vidljivo je da su u prvoj fazi ta odstupanja veća u odnosu na drugu i treću fazu mjerenja u LIMS-u. U trećoj fazi je zamijećen pad odstupanja u području 20 – 100 % u odnosu na mejrno područje 10 – 20 %. Treća faza je pokazala veće vrijednosti ΔX_{wr} od ΔX_r .

- **500 kN**

Rezultati po fazama za 500 kN prikazani su u tablicama 9 i 10:

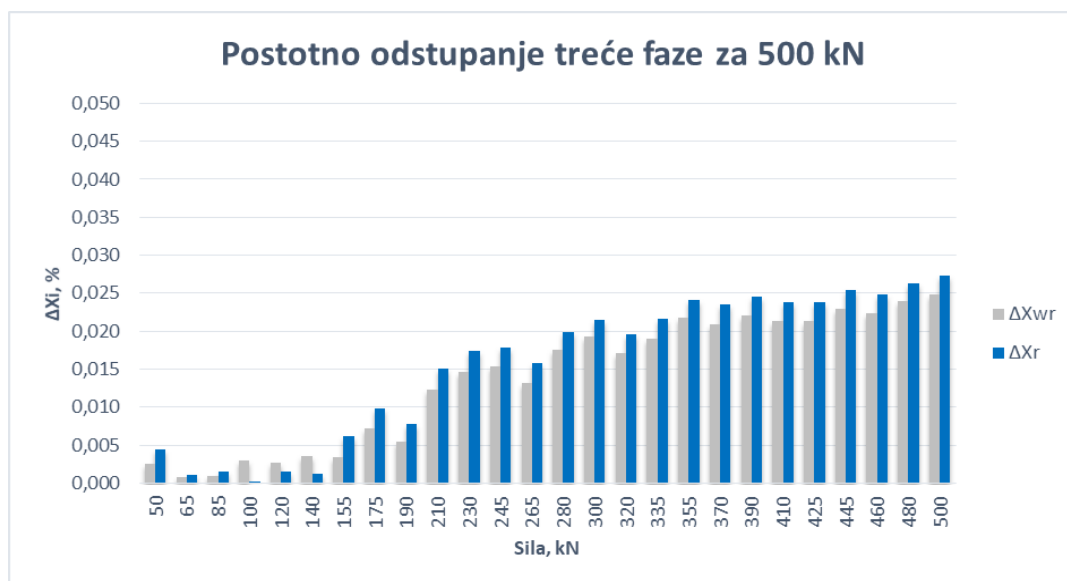
Tablica 9 Vrijednosti X_{wr} prve i druge faze za 500 kN

| | UME | 1. faza | 2. faza | $\Delta X_{1. \text{ faza}}$ | $\Delta X_{2. \text{ faza}}$ |
|-------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| F, kN | $X_{wr} [\text{mV/V}]$ | $X_{wr} [\text{mV/V}]$ | $X_{wr} [\text{mV/V}]$ | $\Delta X_{wr} [\%]$ | $\Delta X_{wr} [\%]$ |
| 50 | 0,199831 | 0,199806 | 0,199803 | 0,013 | 0,014 |
| 100 | 0,399583 | 0,399592 | 0,399585 | -0,002 | -0,001 |
| 150 | 0,599375 | 0,599423 | 0,599419 | -0,008 | -0,007 |
| 200 | 0,799157 | 0,799281 | 0,799234 | -0,016 | -0,010 |
| 250 | 0,998954 | 0,999140 | 0,999129 | -0,019 | -0,018 |
| 300 | 1,198761 | 1,199021 | 1,199009 | -0,022 | -0,021 |
| 350 | 1,398566 | 1,398868 | 1,398853 | -0,022 | -0,021 |
| 400 | 1,598367 | 1,598734 | 1,598715 | -0,023 | -0,022 |
| 450 | 1,798204 | 1,798600 | 1,798579 | -0,022 | -0,021 |
| 500 | 1,998014 | 1,998476 | 1,998454 | -0,023 | -0,022 |

Tablica 10 Vrijednosti X_{wr} i X_r treće faze za 500 kN

| | UME | 3. faza | | $\Delta X_{3.faza}$ | |
|-------|--------------|-----------------|--------------|---------------------|------------------|
| F, kN | X_a [mV/V] | X_{wr} [mV/V] | X_r [mV/V] | ΔX_{wr} [%] | ΔX_r [%] |
| 50 | 0,199804 | 0,199809 | 0,199813 | -0,003 | -0,005 |
| 65 | 0,259744 | 0,259742 | 0,259747 | 0,001 | -0,001 |
| 85 | 0,339663 | 0,339660 | 0,339668 | 0,001 | -0,001 |
| 100 | 0,399602 | 0,399590 | 0,399601 | 0,003 | 0,000 |
| 120 | 0,479520 | 0,479507 | 0,479513 | 0,003 | 0,001 |
| 140 | 0,559437 | 0,559417 | 0,559430 | 0,004 | 0,001 |
| 155 | 0,619375 | 0,619396 | 0,619413 | -0,003 | -0,006 |
| 175 | 0,699292 | 0,699342 | 0,699361 | -0,007 | -0,010 |
| 190 | 0,759230 | 0,759271 | 0,759289 | -0,005 | -0,008 |
| 210 | 0,839147 | 0,839250 | 0,839274 | -0,012 | -0,015 |
| 230 | 0,919064 | 0,919199 | 0,919224 | -0,015 | -0,017 |
| 245 | 0,979002 | 0,979153 | 0,979177 | -0,015 | -0,018 |
| 265 | 1,058920 | 1,059060 | 1,059088 | -0,013 | -0,016 |
| 280 | 1,118859 | 1,119056 | 1,119081 | -0,018 | -0,020 |
| 300 | 1,198778 | 1,199010 | 1,199036 | -0,019 | -0,022 |
| 320 | 1,278698 | 1,278917 | 1,278948 | -0,017 | -0,020 |
| 335 | 1,338639 | 1,338894 | 1,338928 | -0,019 | -0,022 |
| 355 | 1,418561 | 1,418870 | 1,418904 | -0,022 | -0,024 |
| 370 | 1,478503 | 1,478813 | 1,478851 | -0,021 | -0,024 |
| 390 | 1,558427 | 1,558770 | 1,558810 | -0,022 | -0,025 |
| 410 | 1,638353 | 1,638703 | 1,638744 | -0,021 | -0,024 |
| 425 | 1,698298 | 1,698661 | 1,698703 | -0,021 | -0,024 |
| 445 | 1,778227 | 1,778634 | 1,778678 | -0,023 | -0,025 |
| 460 | 1,838174 | 1,838585 | 1,838631 | -0,022 | -0,025 |
| 480 | 1,918106 | 1,918566 | 1,918610 | -0,024 | -0,026 |
| 500 | 1,998041 | 1,998538 | 1,998586 | -0,025 | -0,027 |

Vidljivo je da odstupanje postoji u sve 3 faze i kreće se u rasponu 0,001-0,027 po apsolutnom iznosu. Te vrijednosti dobivene su izrazom (5.16.). Na slici 26 grafički je prikazano postotno odstupanje rezultata treće faze u odnosu na UME.



Slika 26 Postotno odstupanje treće faze u odnosu na UME za 500 kN

Usporedbom rezultata odstupanja pokazivanja posredničkog etalona sile 500 kN za sve tri faze u odnosu na rezultate umjeravanja u UME-u vidljivo je da sve faze pokazuju relativno slična odstupanja, s time da je treća faza je pokazala veće odstupanje. Vrijednosti odstupanja se povećavaju i dostižu vrhunac na nazivnoj sili.

Obzirom da su mjerenja vrlo osjetljiva zbog svoje preciznosti, rezultati su unutar postotnog odstupanja od 0,05% koliko je mjerna nesigurnost uređaja. Ovako malo odstupanje pokazatelj je vrlo dobre ponovljivosti mjerenja. Također se može zaključiti da redoslijed opterećenja i broj točaka mjerenja utječu na mjerenu vrijednost. Pregledom sve tri faze za sva tri posrednička etalona možemo reći da se odstupanja najčešće nalaze unutar 0,025 – 0,035 %. To znači da bi se mogla napraviti korekcija referentnog etalona sile KBNM 500 kN za 0,03 % i time se približiti znatno referentnim vrijednostima koje su dobivene u nacionalnom etalonu UME, Turska. Razlog ovog odmak je najvjerojatnije promjena ulja u hidrauličkom sustavu opterećivanja, no kako linearizacija KBNM 500 kN nije bila predmet ovog rada to će se napraviti u daljnjem radu laboratorija.

6.3.2. Vrijednosti ponovljivosti (b'), obnovljivosti (b), interpolacije (f_c) i histereze (v)

Proračun vrijednosti ponovljivosti (b'), obnovljivosti (b), interpolacije (f_c) i histereze (v) svrstavaju uređaj u određenu klasu. Iz ovih podataka dobiva se uvid koji su uzroci povišene mjerne nesigurnosti, ali i područje sile za koje će se određivati klasa uz proširenu mjernu nesigurnost. Proračun je rađen u sve tri faze za:

- 50 kN,
- 100 kN,
- 500 kN.

• 50 kN

U tablicama 11 i 12 prikazane su vrijednosti pogrešaka ponovljivosti (b'), obnovljivosti (b), interpolacije (f_c) i histereze (v) po pojedinim fazama za 50 kN.

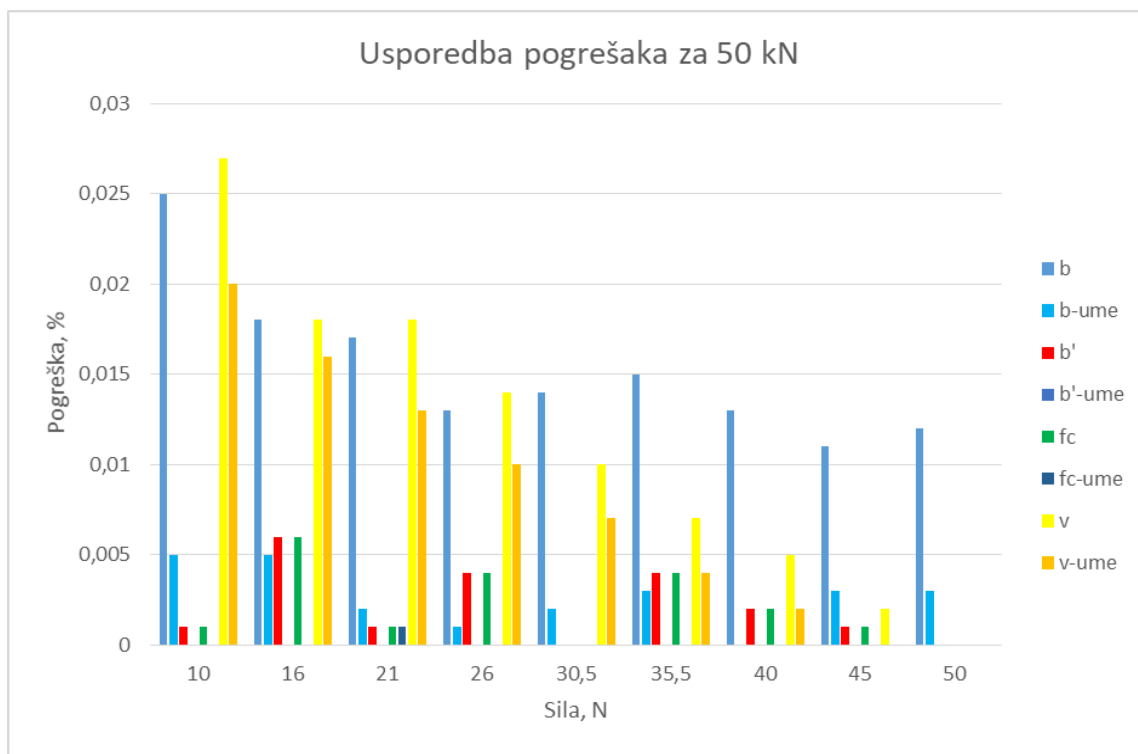
Tablica 11 Vrijednosti ponovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz prve i druge faze za 50 kN

| | 1. faza | | 2. faza | | | UME | | |
|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------------|
| Klasa 00: | 0,025 | ±0,025 | 0,025 | ±0,025 | 0,07 | 0,025 | ±0,025 | 0,07 |
| Klasa 0,5: | 0,050 | ±0,05 | 0,050 | ±0,05 | 0,15 | 0,050 | ±0,05 | 0,15 |
| Klasa 1: | 0,100 | ±0,10 | 0,100 | ±0,10 | 0,30 | 0,100 | ±0,10 | 0,30 |
| Klasa 2: | 0,200 | ±0,20 | 0,200 | ±0,20 | 0,50 | 0,200 | ±0,20 | 0,50 |
| F, kN | b', % | f_c, % | b', % | f_c, % | v, % | b', % | f_c, % | v, % |
| 10 | 0,009 | -0,017 | 0,002 | -0,080 | -0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,020 |
| 15 | 0,004 | 0,009 | 0,006 | 0,038 | 0,008 | 0,000 | 0,000 | 0,016 |
| 20 | 0,011 | 0,025 | 0,006 | 0,024 | 0,006 | 0,000 | 0,001 | 0,013 |
| 25 | 0,008 | 0,023 | 0,009 | 0,020 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,010 |
| 30 | 0,011 | 0,016 | 0,010 | 0,010 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,007 |
| 35 | 0,008 | -0,011 | 0,008 | -0,010 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,004 |
| 40 | 0,009 | -0,024 | 0,009 | -0,025 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| 45 | 0,008 | -0,013 | 0,011 | -0,015 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 50 | 0,011 | 0,015 | 0,005 | 0,017 | - | 0,000 | 0,000 | - |

Tablica 12 Vrijednosti ponovljivosti, obnovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz treće faze za 50 kN

| | 3. faza | | | | UME | | | |
|-------------------|-------------|--------------|-------------------------|-------------|-------------|--------------|-------------------------|-------------|
| Klasa 00: | 0,025 | 0,05 | ±0,025 | 0,07 | 0,025 | 0,05 | ±0,025 | 0,07 |
| Klasa 0,5: | 0,050 | 0,10 | ±0,05 | 0,15 | 0,050 | 0,10 | ±0,05 | 0,15 |
| Klasa 1: | 0,100 | 0,20 | ±0,10 | 0,30 | 0,100 | 0,20 | ±0,10 | 0,30 |
| Klasa 2: | 0,200 | 0,40 | ±0,20 | 0,50 | 0,200 | 0,40 | ±0,20 | 0,50 |
| F, kN | b, % | b', % | f_c, % | v, % | b, % | b', % | f_c, % | v, % |
| 10,0 | 0,025 | 0,005 | -0,001 | 0,027 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,020 |
| 11,5 | 0,022 | 0,006 | 0,011 | 0,023 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,020 |
| 13,0 | 0,022 | 0,007 | -0,001 | 0,022 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,020 |
| 14,5 | 0,025 | 0,002 | -0,004 | 0,018 | 0,003 | 0,000 | 0,000 | 0,020 |
| 16,0 | 0,018 | 0,005 | 0,006 | 0,018 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,016 |
| 18,0 | 0,023 | 0,005 | -0,005 | 0,020 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,016 |
| 19,5 | 0,019 | 0,000 | 0,001 | 0,018 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,016 |
| 21,0 | 0,017 | 0,002 | 0,001 | 0,018 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,013 |
| 22,5 | 0,016 | 0,002 | -0,002 | 0,015 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,013 |
| 24,0 | 0,013 | 0,001 | -0,004 | 0,013 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,013 |
| 26,0 | 0,013 | 0,001 | 0,004 | 0,014 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,010 |
| 27,5 | 0,014 | 0,000 | -0,001 | 0,012 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,010 |
| 29,0 | 0,014 | 0,006 | 0,000 | 0,011 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,010 |
| 30,5 | 0,014 | 0,002 | 0,000 | 0,010 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,007 |
| 32,0 | 0,015 | 0,001 | -0,003 | 0,010 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,007 |
| 34,0 | 0,014 | 0,001 | 0,000 | 0,009 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,007 |
| 35,5 | 0,015 | 0,003 | 0,004 | 0,007 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,004 |
| 37,0 | 0,012 | 0,001 | 0,003 | 0,005 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,004 |
| 38,5 | 0,015 | 0,001 | -0,002 | 0,007 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,004 |
| 40,0 | 0,013 | 0,000 | -0,002 | 0,005 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| 42,0 | 0,012 | 0,001 | 0,000 | 0,004 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| 43,5 | 0,014 | 0,002 | 0,000 | 0,004 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| 45,0 | 0,011 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 46,5 | 0,014 | 0,001 | 0,001 | 0,002 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 48,0 | 0,012 | 0,004 | -0,001 | 0,002 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,000 |
| 50,0 | 0,012 | 0,003 | 0,000 | - | 0,005 | 0,000 | 0,000 | - |

Na slici 27 prikazane su usporedbe pogrešaka između treće faze i iz UME-a.



Slika 27 Usporedba pogrešaka treće faze i UME-a za 50 kN

Prema tablicama 12 i 13 na slici 27 vidljivo je da su najveće pogreške pogreške histereze (v) i obnovljivost (b). Pogreška histereze pokazuje najveću vrijednost na najnižoj sili (10 kN) te ona opada s približavanjem nazivnoj sili, dok obnovljivost također pokazuje najveću vrijednost na najnižoj sili, a porastom se smanjuje do 26 kN, a nakon nje fluktuiraju. Također se može primijetiti značajna razlika između obnovljivosti rezultata iz UME-a i dobivenih mjerenja u ovom radu.

- **100 kN**

U tablicama 13 i 14 prikazane su vrijednosti pogrešaka ponovljivosti (b'), obnovljivosti (b), interpolacije (f_c) i histereze (v) po pojedinim fazama za 100 kN.

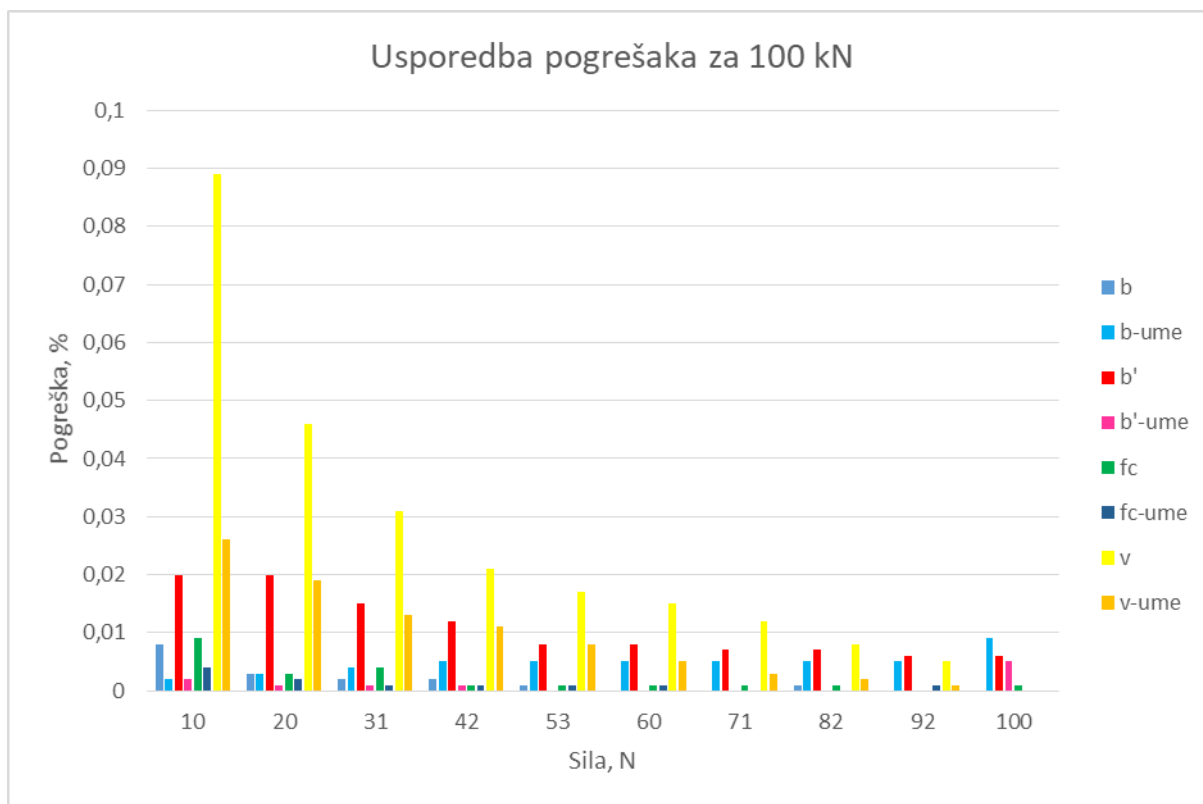
Tablica 13 Vrijednosti ponovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz prve i druge faze za 100 kN

| | 1. faza | | 2. faza | | | UME | | |
|---------------------------|----------|-----------|----------|-----------|---------|----------|-----------|---------|
| Klasa 00: | 0,025 | ±0,025 | 0,025 | ±0,025 | 0,07 | 0,025 | ±0,025 | 0,07 |
| Klasa 0,5: | 0,050 | ±0,05 | 0,050 | ±0,05 | 0,15 | 0,050 | ±0,05 | 0,15 |
| Klasa 1: | 0,100 | ±0,10 | 0,100 | ±0,10 | 0,30 | 0,100 | ±0,10 | 0,30 |
| Klasa 2: | 0,200 | ±0,20 | 0,200 | ±0,20 | 0,50 | 0,200 | ±0,20 | 0,50 |
| F, kN | b' , % | f_c , % | b' , % | f_c , % | v , % | b' , % | f_c , % | v , % |
| 10 | 0,000 | -0,007 | 0,002 | -0,017 | -0,004 | 0,002 | 0,004 | 0,026 |
| 20 | 0,000 | 0,008 | 0,002 | 0,003 | -0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,019 |
| 30 | 0,000 | 0,008 | 0,003 | 0,003 | -0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,013 |
| 40 | 0,000 | 0,007 | 0,000 | -0,002 | -0,001 | 0,001 | -0,001 | 0,011 |
| 50 | 0,000 | 0,017 | 0,001 | 0,001 | -0,001 | 0,000 | -0,001 | 0,008 |
| 60 | 0,000 | 0,024 | 0,001 | 0,000 | -0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,005 |
| 70 | 0,000 | 0,033 | 0,001 | 0,000 | -0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,003 |
| 80 | 0,000 | 0,043 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| 90 | 0,000 | 0,056 | 0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,001 |
| 100 | 0,000 | 0,067 | 0,002 | 0,000 | - | 0,005 | 0,000 | - |

Tablica 14 Vrijednosti ponovljivosti, obnovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz treće faze za 100 kN

| | 3. faza | | | | UME | | | |
|-------------------|------------------|------------------|-------------------------|---------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------|
| | Ponovljivo st | Obnovljivo st | Interpolac ija | Histerez a | Ponovljiv ost | Obnovljiv ost | Interpolac ija | Histereza |
| Klasa 00: | 0,025 | 0,05 | ±0,025 | 0,7 | 0,025 | 0,05 | ±0,025 | 0,7 |
| Klasa 0,5: | 0,050 | 0,10 | ±0,05 | 0,15 | 0,050 | 0,10 | ±0,05 | 0,15 |
| Klasa 1: | 0,100 | 0,20 | ±0,10 | 0,30 | 0,100 | 0,20 | ±0,10 | 0,30 |
| Klasa 2: | 0,200 | 0,40 | ±0,20 | 0,50 | 0,200 | 0,40 | ±0,20 | 0,50 |
| F, kN | b, % | b', % | f_c, % | v, % | b, % | b', % | f_c, % | v, % |
| 10 | 0,008 | 0,020 | -0,009 | 0,089 | 0,002 | 0,002 | 0,004 | 0,026 |
| 13 | 0,001 | 0,020 | -0,006 | 0,069 | 0,002 | 0,002 | 0,004 | 0,026 |
| 17 | 0,000 | 0,017 | 0,008 | 0,051 | 0,002 | 0,002 | 0,004 | 0,026 |
| 20 | 0,003 | 0,020 | 0,003 | 0,046 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,019 |
| 24 | 0,001 | 0,018 | 0,000 | 0,038 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,019 |
| 28 | 0,000 | 0,014 | -0,004 | 0,034 | 0,003 | 0,001 | 0,002 | 0,019 |
| 31 | 0,002 | 0,015 | 0,004 | 0,031 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,013 |
| 35 | 0,000 | 0,012 | 0,004 | 0,026 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,013 |
| 38 | 0,000 | 0,012 | 0,001 | 0,023 | 0,004 | 0,001 | 0,001 | 0,013 |
| 42 | 0,002 | 0,012 | -0,001 | 0,021 | 0,005 | 0,001 | -0,001 | 0,011 |
| 46 | 0,001 | 0,010 | 0,000 | 0,020 | 0,005 | 0,001 | -0,001 | 0,011 |
| 49 | 0,001 | 0,009 | -0,002 | 0,018 | 0,005 | 0,001 | -0,001 | 0,011 |
| 53 | 0,001 | 0,008 | -0,001 | 0,017 | 0,005 | 0,000 | -0,001 | 0,008 |
| 56 | 0,001 | 0,008 | -0,001 | 0,016 | 0,005 | 0,000 | -0,001 | 0,008 |
| 60 | 0,000 | 0,008 | -0,001 | 0,015 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,005 |
| 64 | 0,000 | 0,007 | 0,001 | 0,014 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,005 |
| 67 | 0,000 | 0,007 | -0,002 | 0,013 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,005 |
| 71 | 0,000 | 0,007 | -0,001 | 0,012 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,003 |
| 74 | 0,000 | 0,007 | 0,001 | 0,011 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,003 |
| 78 | 0,000 | 0,006 | 0,001 | 0,010 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,003 |
| 82 | 0,001 | 0,007 | 0,001 | 0,008 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| 85 | 0,001 | 0,006 | 0,001 | 0,007 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| 89 | 0,000 | 0,005 | 0,000 | 0,006 | 0,005 | 0,000 | 0,000 | 0,002 |
| 92 | 0,000 | 0,006 | 0,000 | 0,005 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,001 |
| 96 | 0,001 | 0,006 | 0,000 | 0,004 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | 0,001 |
| 100 | 0,000 | 0,006 | -0,001 | - | 0,009 | 0,005 | 0,000 | - |

Na slici 28 prikazane su usporedbe pogrešaka između treće faze i iz UME-a.



Slika 28 Usporedba pogrešaka treće faze i UME-a za 100 kN

Prema tablicama 13 i 14 na slici 28 vidljivo je da je pogreška histereze (v) najveća u odnosu na ostale pogreške. Najveća pogreška histereze je na najnižoj sili (10 kN) te ona opada s približavanjem nazivnoj rijednosti. Sve ostale pogreške su pokazale slične iznose onima iz UME-a.

• **500 kN**

U tablicama 15 i 16 prikazane su vrijednosti pogrešaka ponovljivosti (b'), obnovljivosti (b), interpolacije (f_c) i histereze (v) po pojedinim fazama za 500 kN.

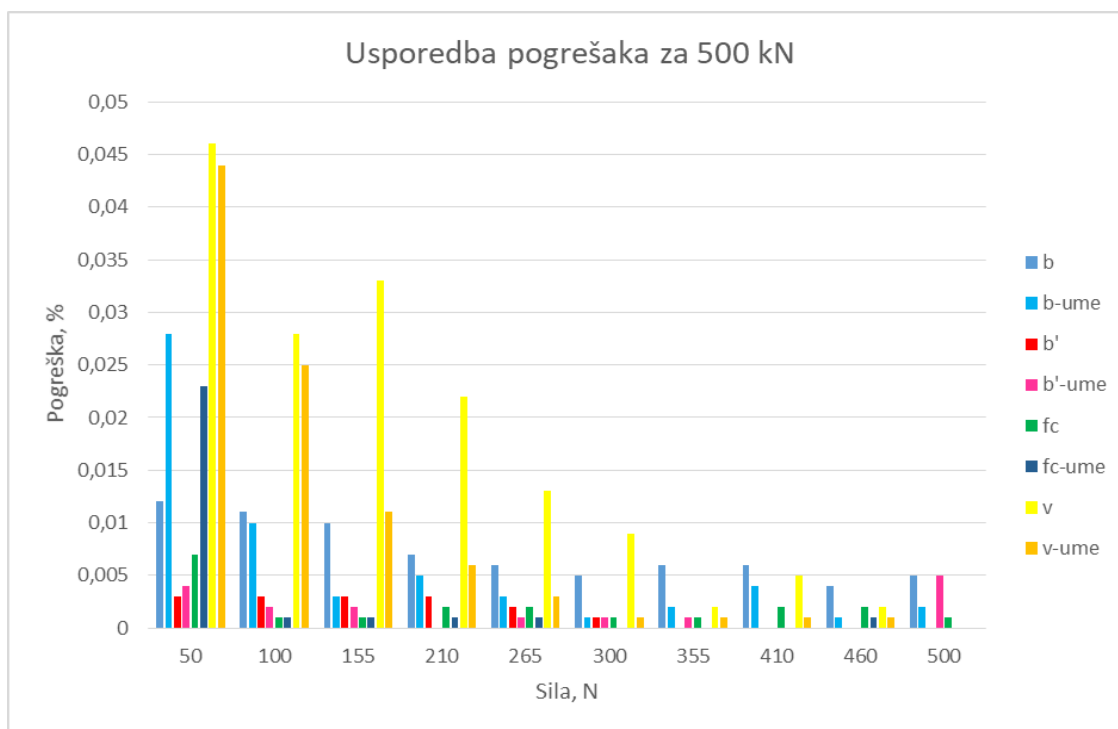
Tablica 15 Vrijednosti ponovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz prve i druge faze za 500 kN

| | 1. faza | | 2. faza | | | UME | | |
|---------------------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|---------------|------------------|-------------------|---------------|
| | Ponovljivo st | Interpolaci ja | Ponovljivo st | Interpolaci ja | Histerez a | Ponovljivo st | Interpolaci ja | Histerez a |
| Klasa 00: | 0,025 | $\pm 0,025$ | 0,025 | $\pm 0,025$ | 0,70 | 0,025 | $\pm 0,025$ | 0,70 |
| Klasa 0,5: | 0,050 | $\pm 0,05$ | 0,050 | $\pm 0,05$ | 0,15 | 0,050 | $\pm 0,05$ | 0,15 |
| Klasa 1: | 0,100 | $\pm 0,10$ | 0,100 | $\pm 0,10$ | 0,30 | 0,100 | $\pm 0,10$ | 0,30 |
| Klasa 2: | 0,200 | $\pm 0,20$ | 0,200 | $\pm 0,20$ | 0,50 | 0,200 | $\pm 0,20$ | 0,50 |
| F, kN | b' , % | f_c , % | b' , % | f_c , % | v , % | b' , % | f_c , % | v , % |
| 50 | 0,000 | 0,005 | 0,001 | 0,005 | 0,001 | 0,004 | 0,023 | 0,044 |
| 100 | 0,000 | -0,003 | 0,000 | -0,010 | -0,002 | 0,002 | -0,001 | 0,025 |
| 150 | 0,000 | -0,002 | 0,001 | -0,009 | -0,002 | 0,002 | -0,001 | 0,011 |
| 200 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | -0,011 | -0,002 | 0,000 | -0,001 | 0,006 |
| 250 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | -0,006 | -0,001 | 0,001 | -0,001 | 0,003 |
| 300 | 0,000 | 0,002 | 0,001 | -0,003 | -0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| 350 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | -0,004 | -0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 400 | 0,000 | -0,001 | 0,002 | -0,003 | -0,001 | 0,000 | 0,000 | 0,001 |
| 450 | 0,000 | -0,001 | 0,001 | -0,002 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,001 |
| 500 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,000 | - | 0,000 | 0,000 | - |

Tablica 16 Vrijednosti ponovljivosti, obnovljivosti, interpolacije i histereze dobivene iz treće faze za 500 kN

| | 3. faza | | | | UME | | | |
|-------------------|------------------|------------------|-------------------------|---------------|------------------|------------------|-------------------------|-------------|
| | Ponovljivo st | Obnovljivo st | Interpola cija | Histerez a | Ponovljiv ost | Obnovljiv ost | Interpolac ija | Histereza |
| Klasa 00: | 0,025 | 0,05 | ±0,025 | 0,7 | 0,025 | 0,05 | ±0,025 | 0,7 |
| Klasa 0,5: | 0,050 | 0,10 | ±0,05 | 0,15 | 0,050 | 0,10 | ±0,05 | 0,15 |
| Klasa 1: | 0,100 | 0,20 | ±0,10 | 0,30 | 0,100 | 0,20 | ±0,10 | 0,30 |
| Klasa 2: | 0,200 | 0,40 | ±0,20 | 0,50 | 0,200 | 0,40 | ±0,20 | 0,50 |
| F, kN | b, % | b', % | f_c, % | v, % | b, % | b', % | f_c, % | v, % |
| 50 | 0,012 | 0,003 | 0,007 | 0,046 | 0,028 | 0,004 | 0,023 | 0,044 |
| 65 | 0,011 | 0,004 | 0,003 | 0,043 | 0,028 | 0,004 | 0,023 | 0,044 |
| 85 | 0,011 | 0,003 | 0,002 | 0,032 | 0,028 | 0,004 | 0,023 | 0,044 |
| 100 | 0,011 | 0,003 | -0,001 | 0,028 | 0,010 | 0,002 | -0,001 | 0,025 |
| 120 | 0,008 | 0,002 | -0,005 | 0,024 | 0,010 | 0,002 | -0,001 | 0,025 |
| 140 | 0,011 | 0,004 | -0,007 | 0,027 | 0,010 | 0,002 | -0,001 | 0,025 |
| 155 | 0,010 | 0,003 | -0,001 | 0,033 | 0,003 | 0,002 | -0,001 | 0,011 |
| 175 | 0,009 | 0,003 | 0,001 | 0,028 | 0,003 | 0,002 | -0,001 | 0,011 |
| 190 | 0,007 | 0,002 | -0,003 | 0,026 | 0,003 | 0,002 | -0,001 | 0,011 |
| 210 | 0,007 | 0,003 | 0,002 | 0,022 | 0,005 | 0,000 | -0,001 | 0,006 |
| 230 | 0,006 | 0,002 | 0,003 | 0,019 | 0,005 | 0,000 | -0,001 | 0,006 |
| 245 | 0,005 | 0,001 | 0,002 | 0,016 | 0,005 | 0,000 | -0,001 | 0,006 |
| 265 | 0,006 | 0,002 | -0,002 | 0,013 | 0,003 | 0,001 | -0,001 | 0,003 |
| 280 | 0,005 | 0,001 | 0,001 | 0,011 | 0,003 | 0,001 | -0,001 | 0,003 |
| 300 | 0,005 | 0,001 | 0,001 | 0,009 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| 320 | 0,006 | 0,000 | -0,002 | 0,006 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| 335 | 0,007 | 0,000 | -0,001 | 0,005 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| 355 | 0,006 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,001 |
| 370 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 390 | 0,006 | 0,000 | 0,000 | 0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 410 | 0,006 | 0,000 | -0,002 | 0,005 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,001 |
| 425 | 0,005 | 0,000 | -0,002 | 0,005 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,001 |
| 445 | 0,005 | 0,000 | -0,001 | 0,003 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,001 |
| 460 | 0,004 | 0,000 | -0,002 | 0,002 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 |
| 480 | 0,004 | 0,000 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | 0,000 | 0,001 | 0,001 |
| 500 | 0,005 | 0,000 | 0,001 | - | 0,002 | 0,005 | 0,000 | - |

Na slici 29 prikazane su usporedbe pogrešaka između treće faze i iz UME-a.



Slika 29 Usporedba pogrešaka treće faze i UME-a za 500 kN

Prema tablicama 15 i 16 na slici 29 vidljivo je da su najveće pogreške pogreška histereze (v) i obnovljivost (b), ali također se na najnižoj sili može primijetiti malo veća greška interpolacije. Pogreške histereze pokazuju najveću vrijednost na najnižoj sili (50 kN) te ona opada s približavanjem nazivnoj vrijednosti. Obnovljivost pokazuje najveću vrijednost na najnižoj sili te ona opada do 300 kN nakon čega počinje fluktuirati (rasti i padati).

Ovdje se rezultati direktno mogu usporediti s kriterijem za klasu navedenih na vrhu tablice. Za svaku silu napravljen je proračun pogrešaka. Vrijednosti pogrešaka opadaju porastom sile što se u ovakvom mjerenju očekuje jer je uobičajeni raspon sile koje se primjenjuju kod posredničkih etalona (dinamometra) 40-100% od nazivne vrijednosti. Posrednički etaloni pokazuju najtočnije vrijednosti približavanjem svojoj nazivnoj vrijednosti. No ta razlika je vrlo mala pa su i na nižim vrijednostima sile očitavanja vrlo dobra što dokazuje i kriterij klase. Kako se konačna klasa i mjerno područje određuje iz proširene mjerne nesigurnosti ovo je samo jedan dio procjene mjernog područja.

6.3.3. Vrijednosti proširene mjerne nesigurnosti u ovisnosti o sili

Proširena mjerna nesigurnost konačno daje uvid u sposobnost mjerenja i umjeravanja akreditacijskog laboratorija. Proračun proširene mjerne nesigurnosti prikazan je za 3 fazu mjerenja. Konačna mjerna nesigurnosti prikazana je u tablicama 17-19 podijeljenih prema opterećenju. Za 50 kN, 100 kN i 500 kN. Primarni nacionalni etalon iz UME-a karakterizira mjernu nesigurnost u iznosu od 0,002% zbog čega su vrijednosti proširene mjerne niže od onih dobivenih umjeravanjem u LIMS-u.

- **Za 50 kN**

Tablica 17 Proširena mjerna nesigurnost za 50 kN

| | Sastavljena mjerna nesigurnost | Proširena nesigurnost umjeravanja sile | UME |
|----------|--------------------------------------|---|---------|
| F , kN | w_c , % | W , % | W , % |
| 10 | 0,031 | 0,062 | 0,023 |
| 16 | 0,029 | 0,058 | 0,019 |
| 21 | 0,028 | 0,057 | 0,015 |
| 26 | 0,028 | 0,056 | 0,013 |
| 30,5 | 0,027 | 0,054 | 0,009 |
| 35,5 | 0,027 | 0,054 | 0,007 |
| 40 | 0,027 | 0,054 | 0,005 |
| 45 | 0,027 | 0,054 | 0,004 |
| 50 | 0,027 | 0,054 | 0,004 |

U tablici 17 za posrednički etalon 50 kN vidljivo je da su rezultati proširene mjerne nesigurnosti umjeravanja u LIMS-u veći od rezultata umjeravanja na primarnom nacionalnom etalonu u UME-u. Približavanjem nazivnoj vrijednosti sile proširene mjerne nesigurnosti se smanjuju.

- **100 kN**

Tablica 18 Proširena mjerna nesigurnost za 100 kN

| | Sastavljena mjerna nesigurnost | Proširena nesigurnost umjeravanja sile | UME |
|--------------|---|---|-------------|
| <i>F, kN</i> | <i>w_c, %</i> | <i>W, %</i> | <i>W, %</i> |
| 10 | 0,034 | 0,068 | 0,031 |
| 20 | 0,031 | 0,062 | 0,022 |
| 31 | 0,029 | 0,059 | 0,016 |
| 42 | 0,028 | 0,056 | 0,013 |
| 53 | 0,027 | 0,054 | 0,010 |
| 60 | 0,027 | 0,054 | 0,007 |
| 71 | 0,026 | 0,053 | 0,005 |
| 82 | 0,026 | 0,052 | 0,004 |
| 92 | 0,026 | 0,052 | 0,004 |
| 100 | 0,026 | 0,053 | 0,008 |

U tablici 18 za posrednički etalon 100 kN vidljivo je da su rezultati proširene mjerne nesigurnosti umjeravanja u LIMS-u veći od rezultata umjeravanja na primarnom nacionalnom etalonu u UME-u. Približavanjem nazivnoj vrijednosti sile proširene mjerne nesigurnosti se smanjuju.

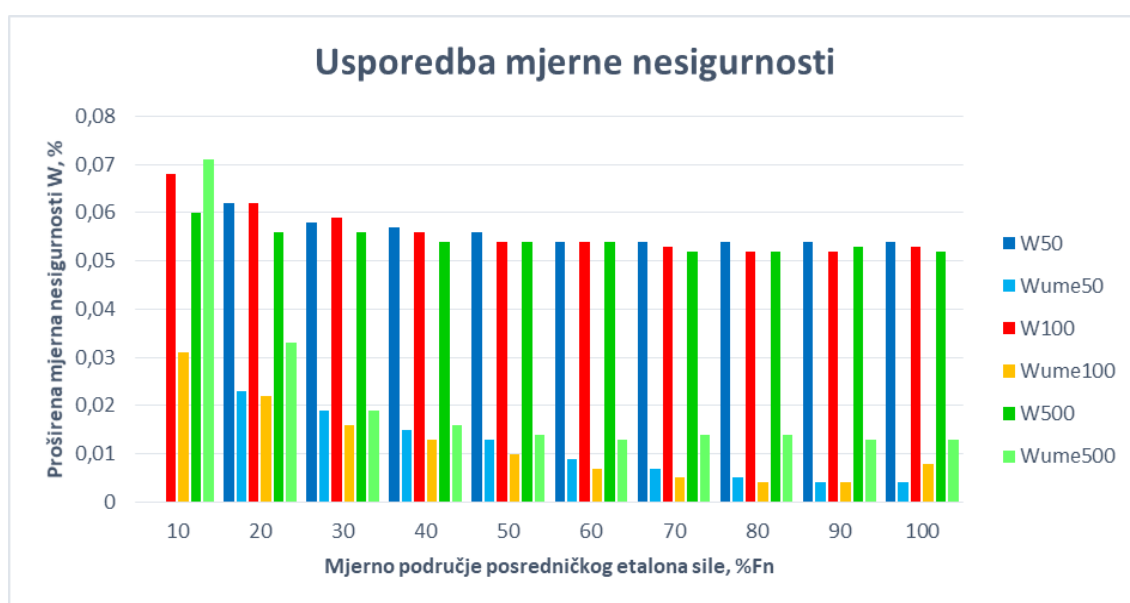
- **500 kN**

Tablica 19 Proširena mjerna nesigurnost za 500 kN

| | Sastavljena mjerna nesigurnost | Proširena nesigurnost umjeravanja sile | UME |
|--------------|---|---|-------------|
| <i>F, kN</i> | <i>w_c, %</i> | <i>W, %</i> | <i>W, %</i> |
| 50 | 0,030 | 0,060 | 0,071 |
| 100 | 0,028 | 0,056 | 0,033 |
| 155 | 0,028 | 0,056 | 0,019 |
| 210 | 0,027 | 0,054 | 0,016 |
| 265 | 0,027 | 0,054 | 0,014 |
| 300 | 0,027 | 0,054 | 0,013 |
| 355 | 0,026 | 0,052 | 0,014 |
| 410 | 0,026 | 0,052 | 0,014 |
| 460 | 0,026 | 0,053 | 0,013 |
| 500 | 0,026 | 0,052 | 0,013 |

U tablici 19 za posrednički etalon 500 kN vidljivo je da su rezultati proširene mjerne nesigurnosti umjeravanja u LIMS-u veći od rezultata umjeravanja na primarnom nacionalnom etalonu u UME-u. Približavanjem nazivnoj vrijednosti sile proširene mjerne nesigurnosti se smanjuju.

Na slici 30 prikazana je usporedba rezultata mjerne nesigurnosti koje su prikazani u tablicama 17-19.



Slika 30 Usporedba mjerne nesigurnosti

Rezultati su prikazani za svako relevantno mjerno područje posredničkog etalona ovisno o nazivnoj sili za svaki posrednički etalon. Iz slike 30 se jasno može vidjeti kako su mjerne nesigurnosti najniže upravo na nazivnoj sili, odnosno najviše na najnižoj sili mjernog područja. Za dinamometar 50 kN označen plavom bojom nije prikazana proširena mjerna nesigurnost za 10% nazivne sile. Sve vrijednosti su manje od 0,08% koliko je granica za dodjeljivanje klase 00.

7. ZAKLJUČAK

Mjerenje sile te održavanje mjerne sljedivosti za silu je bitno za točnost mjerenja mehaničkih svojstava materijala. Na temelju provedenih ispitivanja te analize dobivenih rezultata mogu se donijeti sljedeći zaključci:

- Održavanje mjerne sljedivosti referentnih etalona sile i posredničkih etalona sile podrazumijeva permanentna mjerenja kako prema nacionalnom etalonu sile tako i kroz interne međuprovjere. Razlog tome je što kod komparatornih sustava kao što je KBNM 500 kN u LIMS-u, uslijed dugotrajnog rada može doći do pomicanja referentne vrijednosti. Stoga ovisno o primjeni takvih sustava treba planirati interne međuprovjere te obnavljanje usporedbi s primarnim etalom sile (deadweight).
- Referentni etalon sile KBNM 500 kN nakon provedenih provjera i dalje ima mjernu sposobnost 0,05%. Na temelju dobivenog konstantnog odstupanja kroz cijelo mjerno područje moglo bi se provesti dodatna linearizacija uređaja, te time još bolje poboljšati mjernu sposobnost uređaja.
- Posrednički etaloni sile (Z4A – TOP: 50 kN, 100 kN, 500 kN) su zadržali svoje mjerne sposobnosti što je vidljivo na temelju parametara ponovljivosti, obnovljivosti, interpolacije i histereze koji su značajno niži od granične vrijednosti za klasu 00 sukladno normi HRN EN ISO 376:2012.
- Mjerna sposobnost referentnih etalona sile direktno ovisi o kvaliteti posredničkih etalona sile i o mjernoj sposobnosti primarnog etalona sile. Nije dovoljno da posrednički etaloni sile budu najbolje klase 00 s obzirom na ponovljivost, obnovljivost, interpolacije i histerezu, već da im proširena mjerna nesigurnost bude što manja.
- Izbor i broj mjernih točaka te broj ponavljanja mjerenja ima utjecaja na određivanje mjerne sposobnosti etalonskog mjerila sile što je potvrđeno kroz mjerenja iz treće faze. Treća faza je provedena na većem broju točaka i na većem broju opterećenja i rasterećenja, a time se dobiva i sveobuhvatnija slika stanja nekog etalonskog mjerila.

8. LITERATURA

- [1] <https://www.nceagletimes.com/other-news/2016/11/03/sir-isaac-newton/>
- [2] <http://www.jimonlight.com/2011/11/28/prisma-1666-the-id-of-sir-issac-newton/>
- [3] <http://popularizacija.ifs.hr/wp-content/uploads/2015/10/mfl2-250-erjavec.pdf>
- [4] <http://www.physicsclassroom.com/Physics-Tutorial/Newton-s-Laws>
- [5] https://www.fsb.unizg.hr/elemstroj/pdf/pmf/osnove_strojarstva/osnove_mehanike.pdf
- [6] Dulčić A.: Mehanika - Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno matematički fakultet, 2012.
- [7] Alar Ž.: Procjenjivanje nesigurnosti rezultata mjerenja sile, Magistarski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [8] EURAMET cg-4, Version 2.0: Uncertainty of force measurements, Braunschweig, Germany, 2011.
- [9] Videc M.: Umjeravanje referentnog etalona sile, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2008.,
- [10] Sawla A.: Uncertainty scope of the force calibration machines, Braunschweig, Germany, 2000.
- [11] Runje B.: Podloge za predavanje: Teorija i tehnika mjerenja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2014.
- [12] Živković V.: Etalonski mjerni sustav, Diplomski rad, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2009
- [13] <http://www.svijet-kvalitete.com/index.php/norme>
- [14] <http://www.hzn.hr/> (Hrvatski zavod za norme)
- [15] Alar Ž., Franz M.: Akreditacija LIMS-a za umjeravanje mjerila sile, Zagreb, 2004.
- [16] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/?action=view&site_id=106&id=2145
- [17] HRN EN ISO 376:2011 Metallic materials – Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines
- [18] <http://www.gtm-gmbh.com/en/products/machines.html>
- [19] <https://www.hbm.com/>
- [20] Aleksandrov Fabijanić T., Franz M.: Radna uputa za umjeravanje i procjenu mjerne nesigurnosti umjeravanja prijenosnih etalona sile, FSB, Zagreb, 2013.
- [21] UME, Ulusal Metroloji Enstitusu; National metrology institute, Tubitak, Turska, 2017.

Linkovi dostupni na dan: 17.01.2018.

PRILOZI

PRILOZI

Prilog 1 Rezultati mjerenja eksperimentalnog dijela rada

U prilogu 1 nalaze se tablice 20-28 s rezultatima mjerenja provedenih u eksperimentalnom dijelu rada podijeljenih prema fazama.

- **Mjerenja 1. faze:**

- **50 kN**

Tablica 20 Rezultati mjerenja 1. faze za 50 kN

| F, kN | | | | | Mjerenja, Xi | | | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 |
| 10 | 0,405197 | 0,405193 | 0,405210 | 0,405215 | 0,405224 | 0,405216 | 0,405125 | 0,405200 | 0,405192 | 0,405219 |
| 15 | 0,605060 | 0,605089 | 0,605098 | 0,605132 | 0,605102 | 0,605120 | 0,605044 | 0,605096 | 0,605040 | 0,605084 |
| 20 | 0,804994 | 0,805017 | 0,805028 | 0,805010 | 0,805033 | 0,805042 | 0,804951 | 0,805004 | 0,804960 | 0,805032 |
| 25 | 1,004856 | 1,004837 | 1,004874 | 1,004876 | 1,004892 | 1,004891 | 1,004820 | 1,004906 | 1,004876 | 1,004915 |
| 30 | 1,204827 | 1,204851 | 1,204874 | 1,204869 | 1,204876 | 1,204882 | 1,204796 | 1,204875 | 1,204843 | 1,204940 |
| 35 | 1,404728 | 1,404740 | 1,404747 | 1,404768 | 1,404770 | 1,404766 | 1,404691 | 1,404761 | 1,404731 | 1,404800 |
| 40 | 1,604632 | 1,604636 | 1,604637 | 1,604672 | 1,604681 | 1,604700 | 1,604593 | 1,604654 | 1,604645 | 1,604723 |
| 45 | 1,804644 | 1,804655 | 1,804690 | 1,804698 | 1,804706 | 1,804718 | 1,804618 | 1,804710 | 1,804657 | 1,804767 |
| 50 | 2,004602 | 2,004637 | 2,004632 | 2,004690 | 2,004679 | 2,004697 | 2,004593 | 2,004675 | 2,004638 | 2,004722 |

- **100 kN**

Tablica 21 Rezultati mjerenja 1. faze za 100 kN

| F, kN | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 10 | 0,187441 | 0,187443 | 0,187479 | 0,187481 | 0,187514 | 0,187455 | 0,187411 | 0,187403 | 0,187389 | 0,187392 |
| 20 | 0,387377 | 0,387401 | 0,387426 | 0,387432 | 0,387443 | 0,387406 | 0,387351 | 0,387369 | 0,387352 | 0,387366 |
| 30 | 0,587266 | 0,587269 | 0,587305 | 0,587311 | 0,587323 | 0,587297 | 0,587258 | 0,587258 | 0,587255 | 0,587258 |
| 40 | 0,787098 | 0,787108 | 0,787149 | 0,787145 | 0,787149 | 0,787126 | 0,787102 | 0,787099 | 0,787098 | 0,787097 |
| 50 | 0,986982 | 0,986989 | 0,987043 | 0,987042 | 0,987038 | 0,987033 | 0,986995 | 0,987010 | 0,987011 | 0,986991 |
| 60 | 1,186835 | 1,186842 | 1,186897 | 1,186910 | 1,186911 | 1,186890 | 1,186867 | 1,186876 | 1,186873 | 1,186865 |
| 70 | 1,386711 | 1,386727 | 1,386774 | 1,386784 | 1,386777 | 1,386769 | 1,386761 | 1,386766 | 1,386761 | 1,386762 |
| 80 | 1,586601 | 1,586625 | 1,586672 | 1,586675 | 1,586671 | 1,586660 | 1,586674 | 1,586664 | 1,586667 | 1,586671 |
| 90 | 1,786555 | 1,786583 | 1,786624 | 1,786621 | 1,786613 | 1,786605 | 1,786625 | 1,786611 | 1,786627 | 1,786628 |
| 100 | 1,986458 | 1,986501 | 1,986537 | 1,986549 | 1,986529 | 1,986517 | 1,986544 | 1,986545 | 1,986545 | 1,986560 |

- 500 kN

Tablica 22 Rezultati mjerenja 1. faze za 500 kN

| F, kN | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 50 | 0,209818 | 0,209860 | 0,209890 | 0,209915 | 0,209930 | 0,209903 | 0,209920 | 0,209934 | 0,209917 | 0,209937 |
| 100 | 0,409599 | 0,409640 | 0,409675 | 0,409698 | 0,409714 | 0,409688 | 0,409706 | 0,409725 | 0,409704 | 0,409731 |
| 150 | 0,609430 | 0,609460 | 0,609496 | 0,609522 | 0,609540 | 0,609513 | 0,609555 | 0,609558 | 0,609547 | 0,609578 |
| 200 | 0,809294 | 0,809309 | 0,809343 | 0,809378 | 0,809401 | 0,809374 | 0,809414 | 0,809418 | 0,809408 | 0,809438 |
| 250 | 1,009145 | 1,009171 | 1,009200 | 1,009238 | 1,009261 | 1,009235 | 1,009269 | 1,009272 | 1,009272 | 1,009301 |
| 300 | 1,209024 | 1,209048 | 1,209079 | 1,209109 | 1,209147 | 1,209116 | 1,209153 | 1,209160 | 1,209161 | 1,209182 |
| 350 | 1,408857 | 1,408886 | 1,408937 | 1,408956 | 1,408995 | 1,408972 | 1,408994 | 1,409010 | 1,409010 | 1,409028 |
| 400 | 1,608724 | 1,608755 | 1,608792 | 1,608821 | 1,608862 | 1,608836 | 1,608857 | 1,608879 | 1,608879 | 1,608896 |
| 450 | 1,808589 | 1,808621 | 1,808647 | 1,808682 | 1,808733 | 1,808703 | 1,808717 | 1,808756 | 1,808757 | 1,808762 |
| 500 | 2,008467 | 2,008491 | 2,008518 | 2,008554 | 2,008603 | 2,008577 | 2,008601 | 2,008642 | 2,008628 | 2,008642 |

• Mjerenja 2. faze:

- 50 kN

Tablica 23 Rezultati mjerenja 2. faze za 50 kN

| F, kN | X1 | X'1 | X2 | X'2 | X3 | X'3 | X4 | X'4 | X5 | X'5 |
|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 10 | 0,404997 | 0,405023 | 0,404988 | 0,405063 | 0,404989 | 0,405055 | 0,404998 | 0,405073 | 0,405045 | 0,405081 |
| 15 | 0,604905 | 0,604975 | 0,604914 | 0,605040 | 0,604915 | 0,605004 | 0,604921 | 0,604984 | 0,604957 | 0,604991 |
| 20 | 0,804788 | 0,804876 | 0,804834 | 0,804925 | 0,804814 | 0,804943 | 0,804844 | 0,804939 | 0,804872 | 0,804976 |
| 25 | 1,004668 | 1,004766 | 1,004745 | 1,004867 | 1,004704 | 1,004784 | 1,004733 | 1,004836 | 1,004746 | 1,004825 |
| 30 | 1,204564 | 1,204715 | 1,204638 | 1,204745 | 1,204660 | 1,204725 | 1,204655 | 1,204722 | 1,204672 | 1,204768 |
| 35 | 1,404551 | 1,404642 | 1,404624 | 1,404689 | 1,404613 | 1,404669 | 1,404574 | 1,404689 | 1,404652 | 1,404716 |
| 40 | 1,604448 | 1,604464 | 1,604499 | 1,604525 | 1,604470 | 1,604496 | 1,604479 | 1,604528 | 1,604505 | 1,604546 |
| 45 | 1,804417 | 1,804408 | 1,804460 | 1,804469 | 1,804417 | 1,804436 | 1,804439 | 1,804444 | 1,804469 | 1,804448 |
| 50 | 2,004432 | - | 2,004460 | - | 2,004427 | - | 2,004469 | - | 2,004481 | - |
| | X6 | X'6 | X7 | X'7 | X8 | X'8 | X9 | X'9 | X10 | X'10 |
| 0,005252 | 0,005242 | 0,005236 | 0,005241 | 0,005240 | 0,005238 | 0,005237 | 0,005245 | 0,005247 | 0,005253 | |
| 0,404997 | 0,405057 | 0,404944 | 0,405007 | 0,405005 | 0,405064 | 0,404981 | 0,405019 | 0,405024 | 0,405080 | |
| 0,604919 | 0,604968 | 0,604913 | 0,604938 | 0,604936 | 0,604996 | 0,604903 | 0,604958 | 0,604962 | 0,605016 | |
| 0,804860 | 0,804887 | 0,804835 | 0,804858 | 0,804874 | 0,804916 | 0,804799 | 0,804844 | 0,804898 | 0,804924 | |
| 1,004736 | 1,004819 | 1,004690 | 1,004788 | 1,004749 | 1,004869 | 1,004699 | 1,004759 | 1,004795 | 1,004886 | |
| 1,204635 | 1,204768 | 1,204605 | 1,204720 | 1,204676 | 1,204815 | 1,204638 | 1,204738 | 1,204730 | 1,204840 | |
| 1,404664 | 1,404710 | 1,404634 | 1,404660 | 1,404709 | 1,404742 | 1,404626 | 1,404690 | 1,404734 | 1,404799 | |
| 1,604532 | 1,604532 | 1,604474 | 1,604501 | 1,604572 | 1,604580 | 1,604497 | 1,604520 | 1,604607 | 1,604637 | |
| 1,804509 | 1,804482 | 1,804462 | 1,804447 | 1,804529 | 1,804525 | 1,804478 | 1,804465 | 1,804576 | 1,804586 | |
| 2,004502 | - | 2,004476 | - | 2,004519 | - | 2,004498 | - | 2,004632 | - | |

- 100 kN

Tablica 24 Rezultati mjerenja 2. faze za 100kN

| F, kN | X1 | x'1 | X2 | x'2 | X3 | x'3 | X4 | x'4 | X5 | x'5 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 10 | 0,187487 | 0,187558 | 0,187488 | 0,187542 | 0,187497 | 0,187582 | 0,187492 | 0,187566 | 0,187515 | 0,187557 |
| 20 | 0,387433 | 0,387517 | 0,387443 | 0,387501 | 0,387453 | 0,387558 | 0,387446 | 0,387506 | 0,387465 | 0,387510 |
| 30 | 0,587324 | 0,587429 | 0,587342 | 0,587394 | 0,587350 | 0,587443 | 0,587368 | 0,587428 | 0,587358 | 0,587415 |
| 40 | 0,787172 | 0,787257 | 0,787199 | 0,787257 | 0,787203 | 0,787303 | 0,787206 | 0,787270 | 0,787222 | 0,787276 |
| 50 | 0,987076 | 0,987168 | 0,987100 | 0,987163 | 0,987111 | 0,987195 | 0,987120 | 0,987179 | 0,987118 | 0,987176 |
| 60 | 1,186965 | 1,187054 | 1,186987 | 1,187057 | 1,187007 | 1,187091 | 1,187001 | 1,187061 | 1,186991 | 1,187064 |
| 70 | 1,386842 | 1,386944 | 1,386879 | 1,386949 | 1,386899 | 1,386958 | 1,386889 | 1,386948 | 1,386893 | 1,386957 |
| 80 | 1,586771 | 1,586819 | 1,586795 | 1,586844 | 1,586814 | 1,586857 | 1,586807 | 1,586836 | 1,586821 | 1,586863 |
| 90 | 1,786731 | 1,786753 | 1,786756 | 1,786773 | 1,786779 | 1,786774 | 1,786777 | 1,786783 | 1,786777 | 1,786791 |
| 100 | 1,986674 | - | 1,986703 | - | 1,986705 | - | 1,986701 | - | 1,986716 | - |
| | X6 | x'6 | X7 | x'7 | X8 | x'8 | X9 | x'9 | X10 | x'10 |
| | 0,187431 | 0,187537 | 0,187396 | 0,187490 | 0,187402 | 0,187518 | 0,187422 | 0,187482 | 0,187409 | 0,187504 |
| | 0,387395 | 0,387500 | 0,387363 | 0,387447 | 0,387368 | 0,387494 | 0,387379 | 0,387469 | 0,387398 | 0,387469 |
| | 0,587308 | 0,587376 | 0,587270 | 0,587361 | 0,587281 | 0,587399 | 0,587305 | 0,587399 | 0,587308 | 0,587393 |
| | 0,787146 | 0,787247 | 0,787134 | 0,787216 | 0,787132 | 0,787251 | 0,787183 | 0,787260 | 0,787173 | 0,787251 |
| | 0,987068 | 0,987150 | 0,987047 | 0,987123 | 0,987046 | 0,987167 | 0,987108 | 0,987192 | 0,987109 | 0,987177 |
| | 1,186952 | 1,187031 | 1,186936 | 1,187013 | 1,186949 | 1,187064 | 1,187011 | 1,187087 | 1,186997 | 1,187079 |
| | 1,386843 | 1,386894 | 1,386818 | 1,386902 | 1,386849 | 1,386941 | 1,386917 | 1,386987 | 1,386917 | 1,386984 |
| | 1,586755 | 1,586794 | 1,586749 | 1,586797 | 1,586778 | 1,586850 | 1,586858 | 1,586896 | 1,586861 | 1,586895 |
| | 1,786722 | 1,786733 | 1,786713 | 1,786730 | 1,786754 | 1,786773 | 1,786835 | 1,786861 | 1,786831 | 1,786849 |
| | 1,986655 | - | 1,986646 | - | 1,986703 | - | 1,986788 | - | 1,986794 | - |

- 500 kN

Tablica 25 Rezultati mjerenja 2. faze za 500 kN

| F, kN | X1 | x'1 | X2 | x'2 | X3 | x'3 | X4 | x'4 | X5 | x'5 |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 50 | 0,209879 | 0,209852 | 0,209900 | 0,209894 | 0,209940 | 0,209906 | 0,209958 | 0,209941 | 0,209976 | 0,209954 |
| 100 | 0,409658 | 0,409739 | 0,409678 | 0,409784 | 0,409720 | 0,409799 | 0,409742 | 0,409836 | 0,409757 | 0,409853 |
| 150 | 0,609487 | 0,609578 | 0,609506 | 0,609636 | 0,609538 | 0,609642 | 0,609577 | 0,609681 | 0,609581 | 0,609704 |
| 200 | 0,809293 | 0,809405 | 0,809312 | 0,809459 | 0,809351 | 0,809467 | 0,809394 | 0,809510 | 0,809389 | 0,809529 |
| 250 | 1,009190 | 1,009306 | 1,009211 | 1,009361 | 1,009238 | 1,009374 | 1,009287 | 1,009425 | 1,009285 | 1,009433 |
| 300 | 1,209057 | 1,209186 | 1,209088 | 1,209226 | 1,209113 | 1,209253 | 1,209155 | 1,209296 | 1,209176 | 1,209301 |
| 350 | 1,408889 | 1,409000 | 1,408936 | 1,409049 | 1,408954 | 1,409070 | 1,409007 | 1,409118 | 1,409015 | 1,409112 |
| 400 | 1,608742 | 1,608827 | 1,608800 | 1,608886 | 1,608816 | 1,608906 | 1,608861 | 1,608955 | 1,608877 | 1,608952 |
| 450 | 1,808605 | 1,808652 | 1,808657 | 1,808706 | 1,808677 | 1,808721 | 1,808725 | 1,808781 | 1,808734 | 1,808776 |
| 500 | 2,008476 | - | 2,008531 | - | 2,008555 | - | 2,008601 | - | 2,008600 | - |
| | X6 | x'6 | X7 | x'7 | X8 | x'8 | X9 | x'9 | X10 | x'10 |
| | 0,209923 | 0,209906 | 0,209938 | 0,209910 | 0,209946 | 0,209919 | 0,209944 | 0,209930 | 0,209956 | 0,209932 |
| | 0,409704 | 0,409811 | 0,409717 | 0,409813 | 0,409735 | 0,409819 | 0,409729 | 0,409812 | 0,409746 | 0,409820 |
| | 0,609551 | 0,609678 | 0,609555 | 0,609666 | 0,609563 | 0,609679 | 0,609574 | 0,609667 | 0,609590 | 0,609680 |
| | 0,809375 | 0,809503 | 0,809380 | 0,809509 | 0,809386 | 0,809519 | 0,809390 | 0,809494 | 0,809408 | 0,809505 |
| | 1,009265 | 1,009415 | 1,009275 | 1,009410 | 1,009278 | 1,009436 | 1,009285 | 1,009404 | 1,009307 | 1,009417 |
| | 1,209148 | 1,209288 | 1,209162 | 1,209287 | 1,209167 | 1,209320 | 1,209164 | 1,209282 | 1,209192 | 1,209293 |
| | 1,408998 | 1,409122 | 1,409006 | 1,409123 | 1,409018 | 1,409144 | 1,409010 | 1,409115 | 1,409034 | 1,409127 |
| | 1,608872 | 1,608956 | 1,608865 | 1,608961 | 1,608883 | 1,608988 | 1,608871 | 1,608950 | 1,608899 | 1,608970 |
| | 1,808737 | 1,808784 | 1,808740 | 1,808781 | 1,808748 | 1,808826 | 1,808737 | 1,808775 | 1,808766 | 1,808799 |
| | 2,008605 | - | 2,008619 | - | 2,008646 | - | 2,008607 | - | 2,008633 | - |

• Mjerenja 3. faze:

- 50 kN

Tablica 26 Rezultati mjerenja 3. faze za 50 kN

| | 0 | | | | 120 | | | | 240 | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| F, kN | X1 | X'1 | X2 | X'2 | X3 | X'3 | X4 | X'4 | X5 | X'5 | X6 | X'6 |
| 10 | 0,404822 | 0,404884 | 0,404826 | 0,404871 | 0,404905 | 0,404992 | 0,404956 | 0,405044 | 0,404854 | 0,404910 | 0,404925 | 0,405007 |
| 11,5 | 0,464854 | 0,464935 | 0,464849 | 0,464881 | 0,464946 | 0,464996 | 0,464979 | 0,465057 | 0,464865 | 0,464937 | 0,464945 | 0,465038 |
| 13 | 0,524774 | 0,524873 | 0,524760 | 0,524820 | 0,524848 | 0,524938 | 0,524902 | 0,524980 | 0,524781 | 0,524833 | 0,524857 | 0,524929 |
| 14,5 | 0,584716 | 0,584815 | 0,584728 | 0,584779 | 0,584796 | 0,584861 | 0,584870 | 0,584917 | 0,584712 | 0,584797 | 0,584823 | 0,584884 |
| 16 | 0,644759 | 0,644845 | 0,644751 | 0,644807 | 0,644842 | 0,644915 | 0,644889 | 0,645005 | 0,644765 | 0,644861 | 0,644848 | 0,644906 |
| 18 | 0,724652 | 0,724779 | 0,724638 | 0,724716 | 0,724743 | 0,724847 | 0,724812 | 0,724894 | 0,724634 | 0,724810 | 0,724739 | 0,724812 |
| 19,5 | 0,784650 | 0,784775 | 0,784673 | 0,784742 | 0,784750 | 0,784828 | 0,784822 | 0,784943 | 0,784660 | 0,784807 | 0,784758 | 0,784845 |
| 21 | 0,844630 | 0,844732 | 0,844636 | 0,844728 | 0,844736 | 0,844827 | 0,844801 | 0,844934 | 0,844649 | 0,844816 | 0,844732 | 0,844827 |
| 22,5 | 0,904573 | 0,904678 | 0,904576 | 0,904688 | 0,904669 | 0,904750 | 0,904748 | 0,904861 | 0,904623 | 0,904731 | 0,904701 | 0,904776 |
| 24 | 0,964554 | 0,964653 | 0,964564 | 0,964608 | 0,964617 | 0,964684 | 0,964701 | 0,964799 | 0,964561 | 0,964696 | 0,964652 | 0,964725 |
| 26 | 1,044593 | 1,044697 | 1,044600 | 1,044715 | 1,044692 | 1,044797 | 1,044764 | 1,044874 | 1,044617 | 1,044743 | 1,044694 | 1,044797 |
| 27,5 | 1,104524 | 1,104609 | 1,104551 | 1,104610 | 1,104587 | 1,104692 | 1,104719 | 1,104814 | 1,104556 | 1,104681 | 1,104610 | 1,104713 |
| 29 | 1,164477 | 1,164597 | 1,164573 | 1,164586 | 1,164608 | 1,164716 | 1,164693 | 1,164780 | 1,164527 | 1,164648 | 1,164601 | 1,164716 |
| 30,5 | 1,224476 | 1,224590 | 1,224517 | 1,224572 | 1,224579 | 1,224689 | 1,224700 | 1,224761 | 1,224519 | 1,224625 | 1,224578 | 1,224678 |
| 32 | 1,284410 | 1,284513 | 1,284450 | 1,284519 | 1,284526 | 1,284626 | 1,284654 | 1,284706 | 1,284472 | 1,284576 | 1,284527 | 1,284635 |
| 34 | 1,364432 | 1,364538 | 1,364468 | 1,364529 | 1,364540 | 1,364649 | 1,364671 | 1,364712 | 1,364501 | 1,364588 | 1,364541 | 1,364659 |
| 35,5 | 1,424456 | 1,424565 | 1,424514 | 1,424556 | 1,424586 | 1,424661 | 1,424723 | 1,424721 | 1,424520 | 1,424589 | 1,424573 | 1,424670 |
| 37 | 1,484434 | 1,484524 | 1,484466 | 1,484489 | 1,484576 | 1,484641 | 1,484664 | 1,484678 | 1,484529 | 1,484497 | 1,484542 | 1,484624 |
| 38,5 | 1,544345 | 1,544456 | 1,544376 | 1,544420 | 1,544474 | 1,544566 | 1,544621 | 1,544618 | 1,544399 | 1,544445 | 1,544440 | 1,544546 |
| 40 | 1,604328 | 1,604415 | 1,604344 | 1,604378 | 1,604486 | 1,604543 | 1,604579 | 1,604582 | 1,604395 | 1,604386 | 1,604413 | 1,604498 |
| 42 | 1,684361 | 1,684401 | 1,684369 | 1,684375 | 1,684460 | 1,684536 | 1,684592 | 1,684579 | 1,684398 | 1,684388 | 1,684420 | 1,684491 |
| 43,5 | 1,744300 | 1,744372 | 1,744351 | 1,744358 | 1,744446 | 1,744489 | 1,744601 | 1,744540 | 1,744363 | 1,744353 | 1,744387 | 1,744477 |
| 45 | 1,804353 | 1,804351 | 1,804322 | 1,804310 | 1,804487 | 1,804467 | 1,804549 | 1,804549 | 1,804364 | 1,804331 | 1,804381 | 1,804432 |
| 46,5 | 1,864285 | 1,864305 | 1,864295 | 1,864292 | 1,864472 | 1,864451 | 1,864579 | 1,864549 | 1,864336 | 1,864321 | 1,864368 | 1,864421 |
| 48 | 1,924297 | 1,924266 | 1,924248 | 1,924237 | 1,924402 | 1,924410 | 1,924513 | 1,924492 | 1,924276 | 1,924263 | 1,924316 | 1,924341 |
| 50 | 2,004269 | - | 2,004224 | - | 2,004394 | - | 2,004494 | - | 2,004264 | - | 2,004325 | - |

- 100 kN

Tablica 27 Rezultati mjerenja 3. faze za 100 kN

| | 0 | | | | 120 | | | | 240 | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| F, kN | X1 | X'1 | X2 | X'2 | X3 | X'3 | X4 | X'4 | X5 | X'5 | X6 | X'6 |
| 10 | 0,187301 | 0,187401 | 0,187411 | 0,187504 | 0,18738 | 0,187499 | 0,187452 | 0,18753 | 0,18742 | 0,187508 | 0,187462 | 0,18755 |
| 13 | 0,247287 | 0,247385 | 0,247379 | 0,247494 | 0,247388 | 0,247494 | 0,247439 | 0,247532 | 0,24741 | 0,24748 | 0,247453 | 0,247535 |
| 17 | 0,327307 | 0,327407 | 0,327394 | 0,327505 | 0,327411 | 0,327504 | 0,327453 | 0,327539 | 0,327424 | 0,327499 | 0,327471 | 0,327545 |
| 20 | 0,387258 | 0,387364 | 0,387367 | 0,387488 | 0,387387 | 0,387483 | 0,38744 | 0,387509 | 0,38738 | 0,387491 | 0,387429 | 0,387524 |
| 24 | 0,467215 | 0,467348 | 0,467313 | 0,467443 | 0,467351 | 0,467434 | 0,467397 | 0,467475 | 0,467358 | 0,467424 | 0,467375 | 0,467484 |
| 28 | 0,547161 | 0,547284 | 0,547269 | 0,547368 | 0,547287 | 0,547394 | 0,547328 | 0,547436 | 0,547305 | 0,547376 | 0,547328 | 0,54744 |
| 31 | 0,607173 | 0,607313 | 0,607283 | 0,607409 | 0,607308 | 0,607393 | 0,607348 | 0,607423 | 0,607343 | 0,607415 | 0,607324 | 0,607455 |
| 35 | 0,687143 | 0,687269 | 0,687257 | 0,687365 | 0,687275 | 0,687352 | 0,687308 | 0,687406 | 0,68729 | 0,687361 | 0,68731 | 0,687414 |
| 38 | 0,747097 | 0,747213 | 0,747185 | 0,747298 | 0,747223 | 0,747305 | 0,747296 | 0,747363 | 0,747234 | 0,747312 | 0,747254 | 0,747353 |
| 42 | 0,827055 | 0,82716 | 0,827133 | 0,827252 | 0,827176 | 0,827246 | 0,827231 | 0,827305 | 0,827193 | 0,827258 | 0,827185 | 0,827318 |
| 46 | 0,907034 | 0,907139 | 0,907108 | 0,907217 | 0,907129 | 0,907225 | 0,907203 | 0,907283 | 0,907148 | 0,90724 | 0,907156 | 0,907294 |
| 49 | 0,96698 | 0,967086 | 0,967055 | 0,967153 | 0,967089 | 0,967174 | 0,967152 | 0,96724 | 0,96711 | 0,967185 | 0,967112 | 0,967235 |
| 53 | 1,046943 | 1,047054 | 1,047026 | 1,047125 | 1,047057 | 1,047139 | 1,047117 | 1,047199 | 1,047072 | 1,047156 | 1,047081 | 1,047192 |
| 56 | 1,106916 | 1,107029 | 1,106986 | 1,107082 | 1,107016 | 1,107115 | 1,107087 | 1,107178 | 1,107034 | 1,107118 | 1,107047 | 1,107158 |
| 60 | 1,186877 | 1,186975 | 1,186954 | 1,187052 | 1,186979 | 1,187079 | 1,187047 | 1,187141 | 1,186986 | 1,187081 | 1,187002 | 1,187111 |
| 64 | 1,266867 | 1,266973 | 1,266946 | 1,267046 | 1,266982 | 1,267072 | 1,267045 | 1,267133 | 1,26698 | 1,267065 | 1,267004 | 1,267101 |
| 67 | 1,326807 | 1,326897 | 1,326894 | 1,326982 | 1,326899 | 1,327004 | 1,326978 | 1,327068 | 1,326907 | 1,326992 | 1,326928 | 1,327027 |
| 71 | 1,406783 | 1,406876 | 1,406858 | 1,40696 | 1,406894 | 1,406982 | 1,406958 | 1,407045 | 1,406872 | 1,406977 | 1,406922 | 1,406996 |
| 74 | 1,466786 | 1,466864 | 1,466879 | 1,466956 | 1,466892 | 1,466991 | 1,466972 | 1,46704 | 1,466896 | 1,466965 | 1,466918 | 1,466996 |
| 78 | 1,546755 | 1,546821 | 1,546842 | 1,546916 | 1,546867 | 1,54695 | 1,546921 | 1,547004 | 1,546849 | 1,546928 | 1,546904 | 1,546951 |
| 82 | 1,626728 | 1,626777 | 1,62682 | 1,626869 | 1,626832 | 1,626899 | 1,626915 | 1,62695 | 1,626803 | 1,62688 | 1,626873 | 1,626914 |
| 85 | 1,686716 | 1,686763 | 1,68682 | 1,68685 | 1,686823 | 1,686885 | 1,686896 | 1,686926 | 1,686806 | 1,686858 | 1,686867 | 1,686893 |
| 89 | 1,766688 | 1,766714 | 1,766781 | 1,766802 | 1,766799 | 1,766842 | 1,766864 | 1,76688 | 1,76678 | 1,766802 | 1,76682 | 1,766848 |
| 92 | 1,826672 | 1,826675 | 1,826761 | 1,826754 | 1,826779 | 1,826802 | 1,826837 | 1,826836 | 1,826743 | 1,82675 | 1,826792 | 1,826802 |
| 96 | 1,906658 | 1,906657 | 1,906758 | 1,906749 | 1,906786 | 1,906786 | 1,906834 | 1,906831 | 1,906738 | 1,906726 | 1,906802 | 1,906791 |
| 100 | 1,986644 | - | 1,98674 | - | 1,98678 | - | 1,986822 | - | 1,986724 | - | 1,986789 | - |

- 500 kN

Tablica 28 Rezultati mjerenja 3. faze za 500 kN

| | 0 | | | | 120 | | | | 240 | | | |
|-------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| F, kN | X1 | X'1 | X2 | X'2 | X3 | X'3 | X4 | X'4 | X5 | X'5 | X6 | X'6 |
| 50 | 0,209746 | 0,209805 | 0,209872 | 0,209907 | 0,209907 | 0,209940 | 0,209989 | 0,210006 | 0,209990 | 0,210004 | 0,210015 | 0,210026 |
| 65 | 0,269677 | 0,269763 | 0,269807 | 0,269861 | 0,269838 | 0,269900 | 0,269926 | 0,269959 | 0,269924 | 0,269956 | 0,269949 | 0,269993 |
| 85 | 0,349596 | 0,349705 | 0,349723 | 0,349803 | 0,349761 | 0,349856 | 0,349852 | 0,349909 | 0,349846 | 0,349913 | 0,349872 | 0,349943 |
| 100 | 0,409523 | 0,409675 | 0,409657 | 0,409750 | 0,409696 | 0,409822 | 0,409786 | 0,409855 | 0,409781 | 0,409871 | 0,409804 | 0,409912 |
| 120 | 0,489431 | 0,489615 | 0,489582 | 0,489700 | 0,489606 | 0,489769 | 0,489686 | 0,489802 | 0,489701 | 0,489817 | 0,489714 | 0,489861 |
| 140 | 0,569338 | 0,569548 | 0,569495 | 0,569622 | 0,569516 | 0,569700 | 0,569619 | 0,569746 | 0,569619 | 0,569743 | 0,569635 | 0,569802 |
| 155 | 0,629319 | 0,629537 | 0,629473 | 0,629613 | 0,629504 | 0,629697 | 0,629600 | 0,629728 | 0,629602 | 0,629733 | 0,629621 | 0,629793 |
| 175 | 0,709264 | 0,709500 | 0,709420 | 0,709568 | 0,709454 | 0,709661 | 0,709546 | 0,709684 | 0,709548 | 0,709683 | 0,709578 | 0,709757 |
| 190 | 0,769199 | 0,769436 | 0,769342 | 0,769509 | 0,769377 | 0,769606 | 0,769471 | 0,769624 | 0,769480 | 0,769624 | 0,769509 | 0,769698 |
| 210 | 0,849182 | 0,849420 | 0,849318 | 0,849501 | 0,849369 | 0,849591 | 0,849463 | 0,849628 | 0,849454 | 0,849605 | 0,849501 | 0,849693 |
| 230 | 0,929133 | 0,929372 | 0,929265 | 0,929453 | 0,929327 | 0,929543 | 0,929406 | 0,929579 | 0,929398 | 0,929559 | 0,929454 | 0,929647 |
| 245 | 0,989091 | 0,989302 | 0,989215 | 0,989398 | 0,989281 | 0,989484 | 0,989359 | 0,989528 | 0,989353 | 0,989505 | 0,989404 | 0,989588 |
| 265 | 1,069000 | 1,069213 | 1,069119 | 1,069305 | 1,069193 | 1,069385 | 1,069266 | 1,069449 | 1,069259 | 1,069427 | 1,069331 | 1,069498 |
| 280 | 1,129002 | 1,129198 | 1,129109 | 1,129300 | 1,129187 | 1,129383 | 1,129253 | 1,129443 | 1,129253 | 1,129422 | 1,129321 | 1,129492 |
| 300 | 1,208955 | 1,209140 | 1,209064 | 1,209256 | 1,209151 | 1,209325 | 1,209208 | 1,209399 | 1,209201 | 1,209378 | 1,209277 | 1,209435 |
| 320 | 1,288870 | 1,289045 | 1,288964 | 1,289163 | 1,289061 | 1,289224 | 1,289121 | 1,289306 | 1,289119 | 1,289289 | 1,289197 | 1,289340 |
| 335 | 1,348851 | 1,349009 | 1,348937 | 1,349142 | 1,349044 | 1,349206 | 1,349105 | 1,349292 | 1,349097 | 1,349276 | 1,349176 | 1,349310 |
| 355 | 1,428826 | 1,428965 | 1,428914 | 1,429111 | 1,429018 | 1,429148 | 1,429079 | 1,429264 | 1,429074 | 1,429241 | 1,429154 | 1,429265 |
| 370 | 1,488771 | 1,488898 | 1,488855 | 1,489042 | 1,488970 | 1,489092 | 1,489024 | 1,489207 | 1,489027 | 1,489193 | 1,489102 | 1,489207 |
| 390 | 1,568728 | 1,568827 | 1,568812 | 1,568991 | 1,568936 | 1,569029 | 1,568979 | 1,569143 | 1,568987 | 1,569129 | 1,569057 | 1,569134 |
| 410 | 1,648662 | 1,648745 | 1,648743 | 1,648902 | 1,648865 | 1,648947 | 1,648921 | 1,649064 | 1,648927 | 1,649051 | 1,648990 | 1,649061 |
| 425 | 1,708614 | 1,708681 | 1,708707 | 1,708846 | 1,708828 | 1,708887 | 1,708879 | 1,709005 | 1,708890 | 1,709001 | 1,708943 | 1,708996 |
| 445 | 1,788583 | 1,788639 | 1,788685 | 1,788787 | 1,788790 | 1,788846 | 1,788859 | 1,788960 | 1,788872 | 1,788957 | 1,788919 | 1,788950 |
| 460 | 1,848529 | 1,848572 | 1,848641 | 1,848727 | 1,848735 | 1,848788 | 1,848822 | 1,848894 | 1,848837 | 1,848900 | 1,848863 | 1,848906 |
| 480 | 1,928510 | 1,928527 | 1,928621 | 1,928670 | 1,928716 | 1,928736 | 1,928809 | 1,928843 | 1,928808 | 1,928853 | 1,928836 | 1,928859 |
| 500 | 2,008474 | - | 2,008602 | - | 2,008691 | - | 2,008784 | - | 2,008798 | - | 2,008809 | - |